

Уважаемые коллеги!

Редакционная коллегия и редакционный совет журнала
«Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»
поздравляет Вас

с Новым Годом и Рождеством!

Пусть в наступающем 2016 году все мечты и цели
найдут свое воплощение!

Пусть все поставленные задачи в новом году
выполняются с прекрасным настроением!

Пусть успех сопутствует всем начинаниям,
а удовлетворение от работы не знает границ!
Дальнейшего вам развития

и достижения высокого уровня совершенства!
Желаем Вам и в этот праздник, и каждый день
труда творческого, удачных находок,
оригинальных решений!



«ТРАНСПОРТНАЯ НЕДЕЛЯ – 2015»

ЕЖЕГОДНОЕ ДЕЛОВОЕ СОБЫТИЕ, ВКЛЮЧАЮЩЕЕ СЕРИЮ ОБЩЕРОССИЙСКИХ И МЕЖДУНАРОДНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРОБЛЕМАТИКЕ ТРАНСПОРТА

«Транспортная неделя – 2015» состоялась в Москве на территории комплекса «Гостиный Двор» с 30 ноября по 5 декабря 2015 г. Комплекс мероприятий «Транспортная неделя» проводится Министерством транспорта Российской Федерации уже в девятый раз для открытого обсуждения наиболее актуальных транспортных вопросов и укрепления взаимопонимания между представителями государственной власти и бизнес-сообщества.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» принял активное участие в мероприятиях «Транспортной недели»: Форум «Молодые ученые транспортной отрасли», Экспертный диалог «Внутренний водный транспорт России. Системные проблемы и пути их решения», где с докладом выступила проректор по научной работе Татьяна Алексеевна Пантина, Секция Научно-технического совета Министерства транспорта Российской Федерации «Государственная политика в области морского и речного транспорта» и III Форум транспортного образования «Транспортное образование: исторические ценности, состояние, парадигма развития».



На стенде университета были представлены научно-инновационные проекты ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, выполненные совместно с отраслевыми предприятиями:

- Морские линейные контейнерные перевозки (совместный проект с Федеральной антимонопольной службой России);
- Сетевое взаимодействие с целью совместного использования парусника «Мир» перевозки (совместный проект с ФГУП «Росморпорт»);
- Плавучий навигационный знак нового поколения перевозки (совместный проект с ФБУ «Администрация «Волго-Балт»);
- Разработка прототипа интеллектуальной системы по предупреждению столкновений судов в море (совместный проект с ПАО «Совкомфлот»).

Экспозицию ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова на IX Международной выставки «Транспорт России» посетил министр транспорта Российской Федерации Максим Юрьевич Соколов и первый заместитель председателя Комитета Государственной Думы по транспорту Виталий Борисович Ефимов.



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**

Выпуск 6 (34)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 6 (34). — 214 с.

ISSN 2309-5180

«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 средства массовой информации от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования 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»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

Статьи публикуются на русском и английском языках.

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте. По содержанию статьи должны соответствовать тематике журнала, его целям и задачам.

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.

Вестнику присвоен международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2309-5180.

С 2009 г. журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

Индекс для подписки в каталоге «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2015

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

- Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Давыденко А. А.* Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов 7
- Русинов И.А., Эглит Я.Я., Колосов М. А.* Оценка возможного влияния проекта расширения Панамского канала на мировое судоходство 17
- Смоленцев С. В.* Проблема оценки навигационной ситуации в море 23
- Дерябин В. В.* Обзор исследований, посвящённых использованию нейросетевых технологий в судоходстве 29
- Галин А. В.* Обобщённая имитационная модель процесса развития портов 43
- Илесалиев Д. И., Коровяковский Е. К.* Влияние расположения проходов между стеллажами на показатели работы склада водного транспорта 52
- Павленко С. С.* Моделирование технологического взаимодействия морских и тыловых контейнерных терминалов 59
- Наумов В. С., Кочнева И. Б.* Алгоритм учета опасных материалов на судне для обеспечения экологической безопасности при утилизации 72
- Жилиев Д. Е.* Определение минимальной вместимости контейнерного склада сухого порта для обработки переменного грузопотока 79
- Головцов Д. Л.* Задача маршрутизации судов с различной грузоподъёмностью морского транспортного комплекса арктической зоны России 85

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 93

- Волков В. В., Елагин А. А., Демидов А. Л.* Определение уровня моря при помощи спутниковых радионавигационных систем второго поколения 93
- Белов Д. М., Дорошенко Н. И.* Основы методики управления морфодинамикой береговой зоны 99

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 111

- Францев М. Э., Францев И. М.* Способ определения суммарного пропульсивного качества гидродинамического комплекса при проектировании глиссера из композитов 111
- Рублёв И. И.* Разработка экологически безопасного наполнителя, предназначенного для повышения коррозионной устойчивости корпусов морских судов 121
- Горохов М. С.* Обоснование рациональных областей применения различных систем набора железобетонного корпуса 126
- Нгуен Ч. А., Рубан А. Р., Лубенко В. Н.* Корректировка опорного основания стационарной буровой платформы в Каспийском море 135

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 143

- Безюков О. К., Жуков В. А., Воробей К. А.* Анализ энергоэкологического эффекта применения газопоршневых двигателей в судовых энергетических установках 143
- Кушнер Г. А., Мамонтов В. А., Халявкин А. А.* Исследование изменений формы и коэффициента жесткости моделей дейдвудных подшипников из капролона 151

выпуск **6(34)**
2015

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., профессор

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

Т. А. Пантина, д.э.н., проф.

PantinaTA@gumrf.ru

Ю. Н. Горбачев —

ген. конструктор ОАО

«Инженерный центр

судостроения», д.т.н., проф.

С. Гуцма —

ректор Морской академии

(г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров —

ген. директор ЗАО «Морское

инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

Ф. В. Кармазинов —

ген. директор ГУП

«Водоканал 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., член-

корреспондент РАН

Р. М. Юсупов —

директор Санкт-Петербургского

института информатики и

автоматизации РАН, д.т.н.,

проф., член-корреспондент 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:**

О. К. Безюков,
д.т.н., проф.
В. В. Веселков,
д.т.н., проф.
П. А. Гарибин,
д.т.н., проф.
Д. П. Голоскоков,
д.т.н., проф.
Ю. М. Искандеров,
д.т.н., проф.
О. Г. Каратаев,
д.т.н., проф.
А. В. Кириченко,
д.т.н., проф.
М. А. Колосов,
д.т.н., проф.
Е. А. Королева,
д.э.н., проф.
И. И. Костылев,
д.т.н., проф.
Е. А. Лаврентьева,
д.э.н., проф.
А. Ю. Ластовцев,
к.т.н., проф.
В. А. Логиновский,
д.т.н., проф.
Г. В. Макаров,
д.т.н., проф.
В. Е. Марлей,
д.т.н., проф.
А. М. Никитин,
д.т.н., проф.
А. П. Нырков,
д.т.н., проф.
Л. И. Погодаев,
д.т.н., проф.
В. И. Решняк,
д.т.н., проф.
В. В. Романовский,
д.т.н., проф.
А. А. Сикарев,
д.т.н., проф.
С. В. Смоленцев,
д.т.н., проф.
А. Л. Степанов,
д.т.н., проф.
М. В. Сухотерин,
д.т.н., проф.
Е. Г. Трунин,
к.э.н., директор РРР
В. И. Черненко,
д.т.н., проф.
В. Б. Чистов,
д.т.н., проф.

Чернышов Е. А., Романова Е. А., Романов А. Д. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива для воздушнонезависимой энергетической установки 157

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 166

Каретников В. В., Пащенко И. В., Соколов А. И. Построение системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на Северном морском пути 166

Романовский В. В., Сюбаев М. А., Болвашенков И. М. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок 172

Марченко А. А., Родимов Н. В., Труднев С. Ю. Моделирование процесса искусственного нагружения однофазного асинхронного электродвигателя 179

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 187**

Глуценко Л. А., Нырков А. П., Швед Д. В. Применение корреляционного подхода к определению качества речевой информации, зарегистрированной лазерным микрофоном 187

Чертков А. А., Вардомская А. А., Дмитриев А. А. Рекурсивный метод оптимизации логистических путей средствами MATLAB 196

Барышникова Н. Ю. Разработка механизма преобразования запросов на естественном языке в информационной системе 204

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Davydenko A. A.</i> Classification and functional modeling of echeloned container terminals	7
<i>Rusinov I. A., Jeglit Ja. Ja., Kolosov M. A.</i> Assessment of the possible influence of the Panama Canal expansion on the global shipping	17
<i>Smolentsev S. V.</i> The problem of estimation of navigation situation in the sea	23
<i>Deryabin V. V.</i> Review of researches of neural network technologies implementation in navigation	29
<i>Galin A. V.</i> Generalized imitation model of ports development process	43
<i>Ilesaliev D. I., Korovyakovskiy E. K.</i> The impact of aisles disposal in the storage area on water transport warehouse's parameters	52
<i>Pavlenko S. S.</i> Sea ports and inland container terminals interaction modeling	59
<i>Naumov V. S., Kochneva I. B.</i> Algorithm accounting hazardous materials on ship for environmental safety during recycling	72
<i>Zhiliaev D. E.</i> Determination of minimum necessary storage capacity of a dry port container yard with a scheduled cargo turnover	79
<i>Golovcov D. L.</i> Vessels routing problem with heterogeneous fleet in marine transportation complex arctic zone of Russia	85
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	93
<i>Volkov V. V., Elagin A. A., Demidov A. L.</i> Sea level determination by Global Navigation Satellite Systems	93
<i>Belov D. M., Doroshenko N. I.</i> The basic methodology morphodynamical of the coastal zone management	99
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	111
<i>Frantsev M. Je., Frantsev I. M.</i> The mode of determine of the total propulsive quality of hydrodynamic complex in the project of the planing craft from composites	111
<i>Rublov I. I.</i> Development of environmentally sound fillers, designed to improve the corrosion resistance of ship hulls	121
<i>Gorohov M. S.</i> Feasibility study of application of different framing systems of reinforced concrete hull	126
<i>Nguyen T. A., Ruban A. R., Lubenko V. N.</i> The adjustment of the support base of the stationary drilling platform in the Caspian Sea	135
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	143
<i>Bezyukov O. K., Zhukov V. A., Vorobej K. A.</i> The analysis of power and ecological effects of application of gas-piston engines in ship's power plant	143
<i>Kushner G. A., Mamontov V. A., Haljavkin A. A.</i> Research into the change of the form and stiffness coefficient of polyamide sleeve models	151
<i>Chernyshov E. A., Romanova E. A., Romanov A. D.</i> Development of the heatallocating element on the basis of the high-metallized gas-free fuel for the air independent power station	157
ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	166
<i>Karetnikov V. V., Pashchenko I. V., Sokolov A. I.</i> Building a system of management and control high-precision differential field GLONASS on the Northern Sea Route	166

edition **6(34)**
2015

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief

T. A. Pantina
doctor of economic Sciences, Prof.
PantinaTA@gumrf.ru

Yu. N. Gorbachev —
general Designer of JSC
“Engineering center of
shipbuilding”, doctor of technical
Sciences, Prof.

S. Gutsma —
Rector of the 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.

F. V. Karmazinov —
General Director “Vodokanal
of 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

R. M. Yusupov —
director 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, Prof.
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences, Prof.
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences, Prof.
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences, Prof.
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences, Prof.
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences, Prof.
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical Sciences, Prof.
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
G. V. Makarov,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. P. Nyrkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Sikarev,
doctor of technical Sciences, Prof.
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. V. Sukhoterina,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Yershov,
doctor of technical Sciences,
Associate Prof.
A. P. Gorobtsov,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
B. A. Smyslov,
Candidate of Law, Prof.
A. Yu. Sharonov,
candidate of Geography, Associate Prof.
A. Ye. Sazonov,
doctor of technical Sciences, Prof.

<i>Romanovskiy V. V., Sjubaev M. A., Bolvashenkov I. M.</i> Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion system	172
<i>Marchenko A. A., Rodimov N. V., Trudnev S. Ju.</i> Modeling of artificial loading processing of single-phase asynchronous motor	179
INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT	
<i>Glushchenko L. A., Nyrkov A. P., Shved D. V.</i> The use of the correlative approach for determining the voice quality of information which was registered by the «laser microphone»	187
<i>Chertkov A. A., Vardomskeya A. A., Dmitriev A. A.</i> A recursive method of optimization of the logistic ways by means of MATLAB	196
<i>Baryshnikova N. Yu.</i> Development of a mechanism for transforming natural language query in the information system	204

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 656

А. Л. Кузнецов,
А. В. Кириченко,
А. А. Давыденко

КЛАССИФИКАЦИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭШЕЛОНИРОВАННЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

В статье приведены результаты исследования функциональных характеристик и технологических процессов контейнерных терминалов разного вида. Показано, что в ходе своего развития морские порты изменили не только технологию пропуска груза, но и географическую конфигурацию. В настоящее время грузы последовательно проходят цепочку взаимодействующих терминалов (контейнерных площадок), выполняющих функции грузораспределения. Построены функциональные модели взаимодействующих контейнерных терминалов, отличающихся по функциям и операторам, на основании которых предложены классификация контейнерных терминалов, а также общая архитектура контейнерной эшелонированной транспортно-технологической системы. Отмечается, что поскольку указанный подход не позволяет в дальнейшем рассматривать порты как условно обособленные объекты, производство научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, как и последующих инвестиций в отношении морских портов, без учета указанных факторов оказывается бесперспективным.

Ключевые слова: контейнерный терминал; контейнерная площадка; классификация; функциональная модель; контейнерная эшелонированная транспортно-технологическая система.

Эволюционные предпосылки исследования

Эволюция морских портов в течение последнего столетия эксплуатации показала особую нестабильность их развития, выразившуюся не только в технологическом, но и функциональном преобразовании. Из пунктов погрузки-разгрузки судов современные порты не только трансформировались в региональные и глобальные центры грузораспределения, но и изменили географический статус — из условно точечных, ввиду возникшей необходимости, они видоизменились в сетевые объекты. В настоящее время морские терминалы достаточно успешно функционально взаимодействуют с удаленными тыловыми терминалами и площадками, формируя технологически единую эшелонированную грузопроводящую систему.

Путь развития портов, начиная с последней трети XX в. до настоящего времени, является предметом достаточно пристального изучения и, соответственно, классификации. Отнесение того или иного порта к определенному классу дает возможность прогнозировать направление и перспективы его развития, определяет характер и целесообразность инвестиций [1] – [3]. Тем не менее, именно в указанный период в общей структуре порта, одновременно с расширяющимся функционалом, появились ранее отсутствовавшие «тыловые» элементы, формирующие, в том числе, современные сухие порты. Это хорошо заметно при сравнении бытовавшей ранее и предлагаемой в настоящее время классификаций портов (терминалов) в отечественной отраслевой литературе [4] – [6]. Таким образом, в прогностических целях оказывается необходимым после изучения формирующихся межэлементных функциональных отношений между работающими по единой технологии эшелонированными терминалами определить их соответствующую классификацию. В качестве объекта исследования выбраны контейнерные терминалы, поскольку именно контейнерный грузопоток широко дифференцируется по грузовладельцам.

Классификация контейнерных терминалов по логистическим признакам

В современной транспортной логистике в результате долгих дискуссий и споров постепенно выработались основные понятия, которые включают три категорий терминалов [3], [5] – [8], которые приведены на рис. 1.

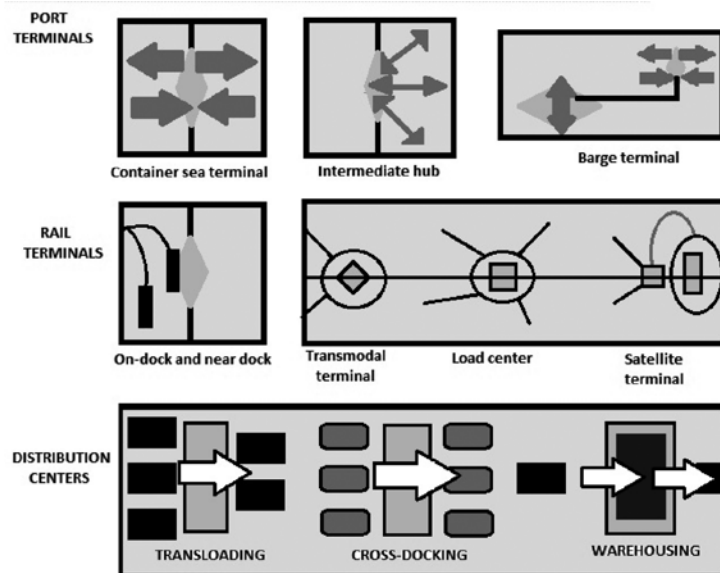


Рис. 1. Типизация логистических терминалов

Как видно из рисунка, в современной транспортной логистике предлагается различать следующие виды терминалов:

- *морские терминалы*, осуществляющие транзит, траншипмент, связывающие морские пути с внутренними водными путями;
- *тыловые терминалы*: железнодорожные терминалы морских портов (на рисунке слева), терминалы-спутники морских портов (справа), железнодорожные терминалы, грузораспределительные (траншипмента) и концевые (трансмодальные);
- *распределительные центры*, выполняющие функции перевалки, комплектации и хранения.

В целях унификации и стандартизации технологических решений, требуемых на терминалах разного типа, следует разработать их классификацию по технологическим признакам — видам грузов и смежного транспорта [9] – [12]. Представляется целесообразным с этой точки зрения рассмотреть грузопотоки, которые связывают воедино все эти терминалы, и на основании этого выбрать различные технологические модели, которые будут положены в основание классификации.

Классификация контейнерных терминалов по технологическим признакам

Функциональная модель морского контейнерного терминала. На рис. 2 показаны основные направления и названия операций по обработке контейнеров, связанные с работой морского терминала.

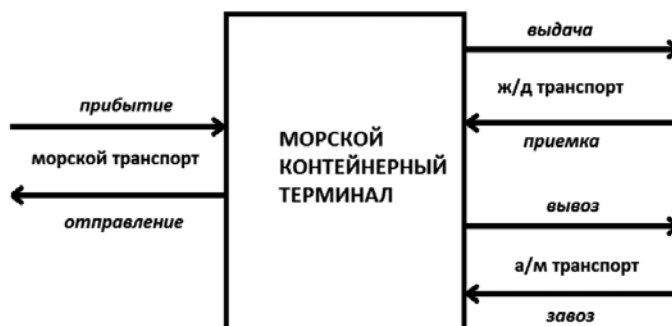


Рис. 2. Операции морского контейнерного терминала

В импортном направлении это прибытие контейнеров на морском судне, в экспортном направлении — отправление их морским судном. По железной дороге контейнеры и генеральные грузы выдаются в тыл (экспортное направление) или принимаются из тыла (импортное направление). Автомобильным транспортом грузы завозятся в порт (экспорт) или вывозятся из него (импорт).

Маршруты прохождения через обобщенный терминал грузопотоков контейнерного и генерального груза, образующие функциональную схему морского контейнерного терминала во взаимодействии с его хинтерлендом, показаны на рис. 3. При этом выделенный фоном прямоугольник в левой части рисунка представляет собственно функциональную модель морского терминала, а правая часть — его взаимодействие с хинтерлендом (аналогично будут рассмотрены и все остальные объекты).

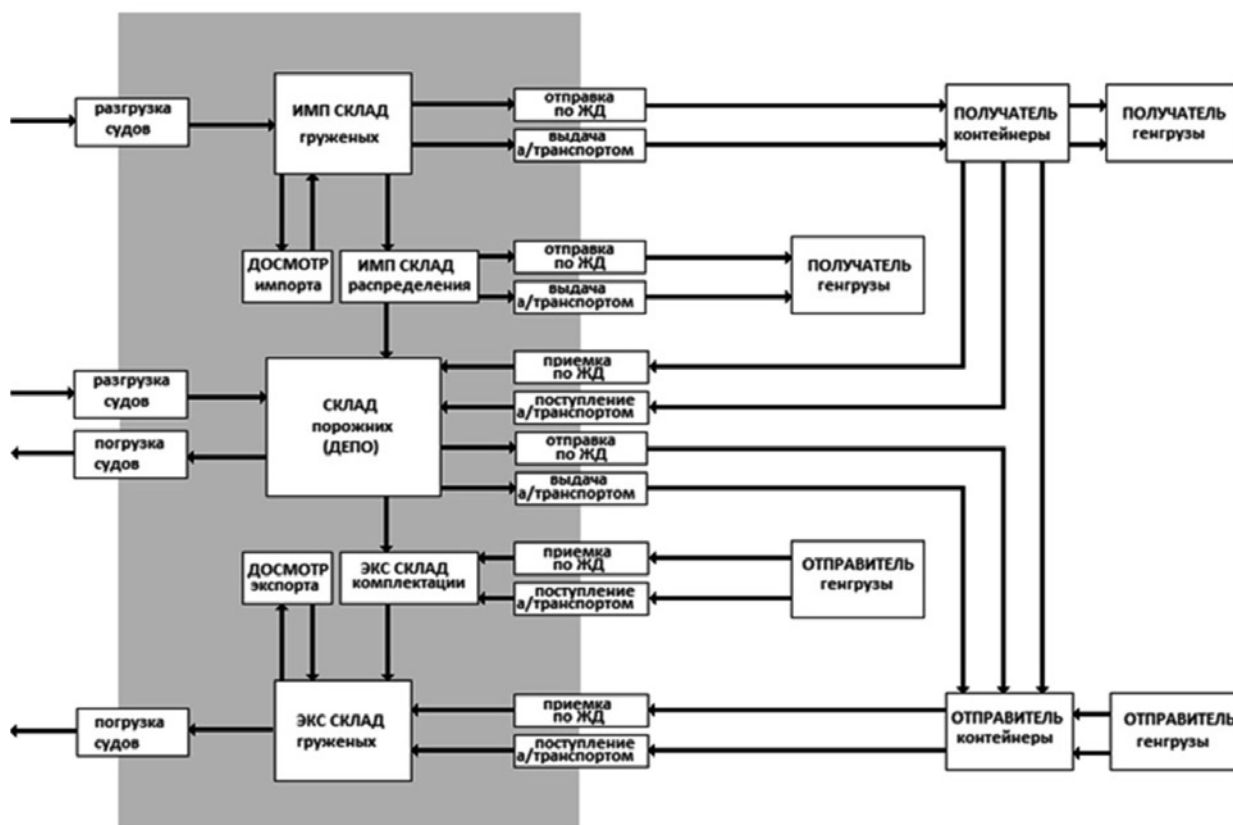


Рис. 3. Модель взаимодействия морского контейнерного терминала с хинтерлендом

В импортном направлении прибывшие морем контейнеры разгружаются с борта судна через морской грузовой фронт (МГФ) и перемещаются на площадку складирования грузопотоков импортного направления. С нее определенное количество контейнеров подается на досмотровый комплекс и по окончании операций досмотра возвращается на площадку, откуда одна часть грузопотоков покидает терминал без растарки, через соответствующие грузовые фронты: автомобильный или железнодорожный. Доставленный получателю контейнер растаривается, после чего порожний контейнер либо возвращается на терминал тем или иным видом транспорта, либо передается отправителю в тылу для затарки и отправки в порт грузопотоком (так называемое *репозиционирование порожних контейнеров*). Другая часть грузопотоков может быть перемещена с площадки хранения на склад комплектации-раскомплектации, где содержимое их будет растарено, т.е. превращено в генеральный груз, который позже покинет терминал тем или иным видом транспорта. Побочным потоком этой ветви является образование порожних контейнеров, которые после растарки на складе комплектации помещаются на площадку порожняка. Сюда также помещаются прибывающие из

тыла порожние контейнеры после их растарки получателем. В случае, если репозиционирование контейнеров в тылу не удовлетворяет спроса грузоотправителей на порожние контейнеры, то с этой площадки они выдаются потребителям в тыл для затарки и последующей доставки через терминал для экспорта.

Груженные экспортные контейнеры из тыла от потребителя доставляются на терминал по суше, где они попадают на площадку открытого хранения контейнеров экспортного направления. Туда же доставляются контейнеры, которые были затарены на складе комплектации прибывшим на терминал генеральным грузом. После досмотра на досмотровом комплексе часть груженных импортных контейнеров отправляется через МГФ из порта на морских судах.

Следует отметить, что в зависимости от функционального назначения терминала доли перераспределяемых грузопотоков могут быть различны. Например, нулевой процент прохождения потока через склад комплектации преобразует терминал в сугубо «ящичный» (box-in/box-out). Нулевая выдача и приемка груженных контейнеров с терминала вернут ему качество традиционного морского контейнерного порта конца XX в., когда контейнеры морских линий затаривались и растаривались на территории порта. Нулевые доли выдачи груза, контейнерного или генерального, превратят терминал в классическое депо порожних контейнеров и т. д.

Следует отметить, что типовые условия работы морского терминала предполагают сбалансированность импортно-экспортных операций через МГФ. Судовые операторы предпочитают увозить в среднем столько же контейнеров, сколько привезли, груженных или порожних. Это достигается работой экспедиторских компаний, а также предоставлением льготных тарифов на репозиционирование порожних контейнеров, вплоть до включения в ставку прямой перевозки стоимость возврата.

Функциональная модель тылового контейнерного терминала. В случае тылового контейнерного терминала поток, представленный импортными и экспортными контейнерами, физически реализован наземным транспортом, перевозящим груз между портом и наземным терминалом (рис. 4).

Соответствующая функциональная схема приведена на рис. 5.

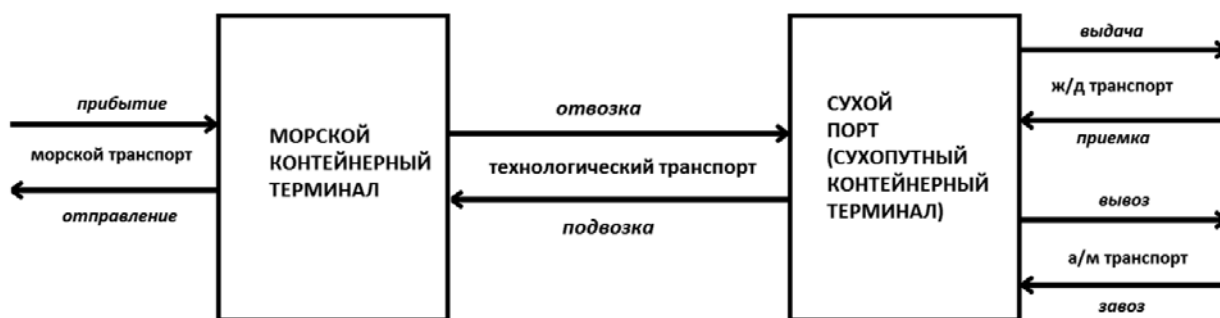


Рис. 4. Взаимодействие морского контейнерного терминала с наземным

Как правило, склад комплектации, предназначенный для затарки / растарки контейнеров на тыловом терминале, является обязательным. Из сравнения функциональных схем работы морского и тылового контейнерных терминалов, приведенных на рис. 2 и 4, видно, что функциональное назначение и взаимодействие его с остальными элементами остается неизменным. В то же время, при сохранении общих функциональных черт, у двух терминальных звеньев цепи поставки в такой конфигурации появляются и существенные для практики различия. Эти различия должны быть учтены при проектировании, планировании эксплуатации, оперативном управлении и развитии терминалов. Функциональная модель грузопотоков наземного контейнерного терминала приведена на рис. 6.

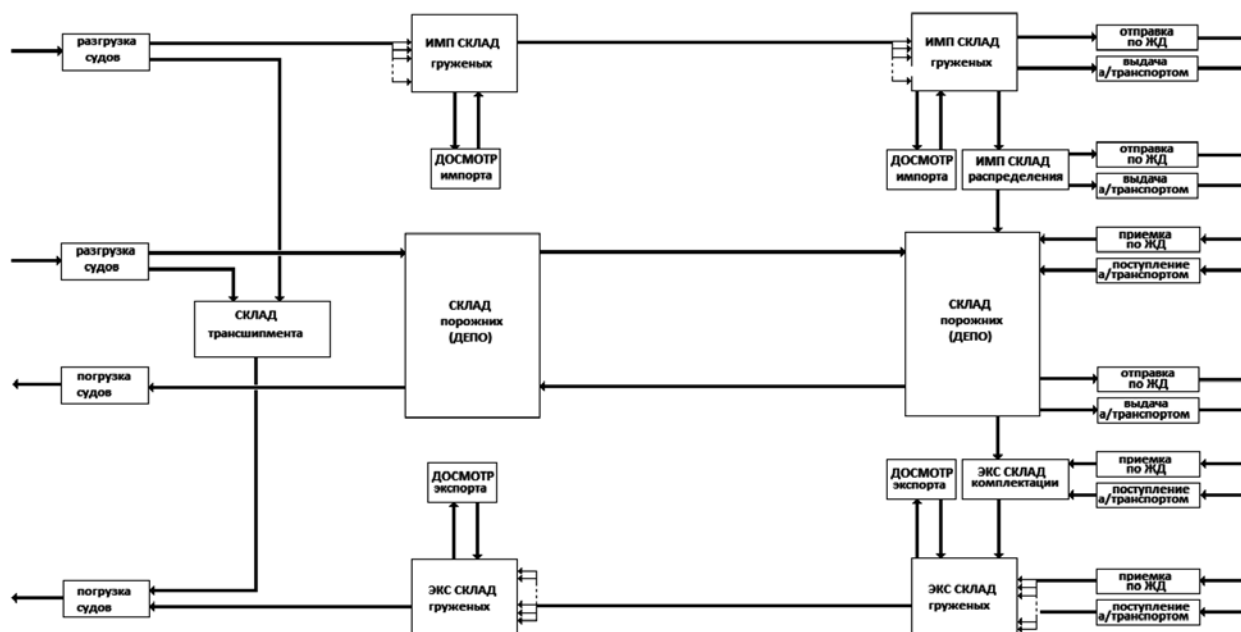


Рис. 5. Модель взаимодействия морского и наземного терминалов

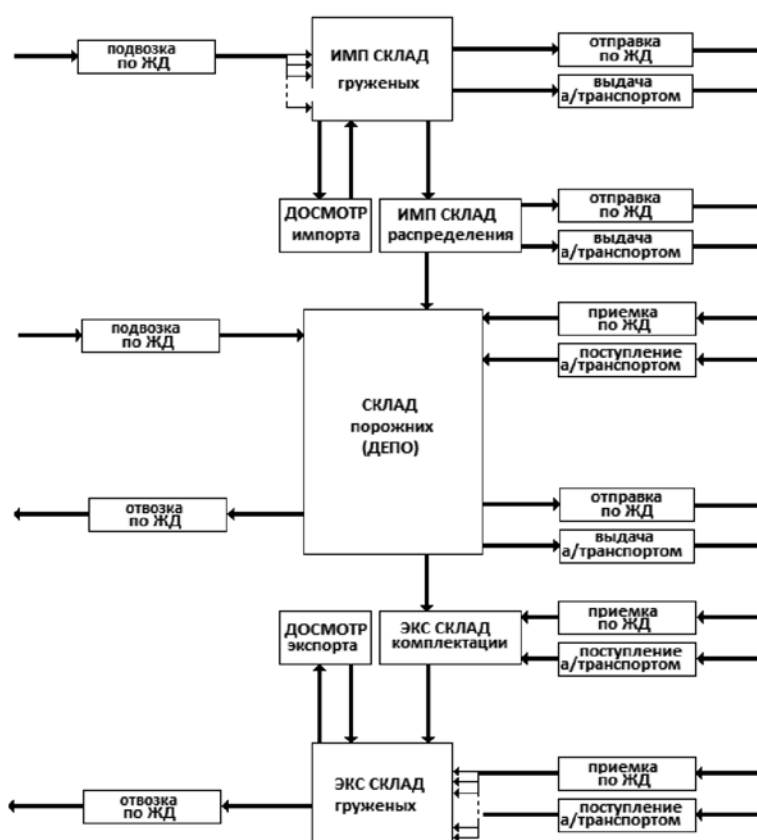


Рис. 6. Функциональная модель наземного терминала

Функциональная модель производственного контейнерного терминала. Контейнерные грузы поступают некоторому конечному множеству потребителей для растарки (преобразования из контейнерных грузов в генеральные). В местах производства продукты, наоборот, затариваются в контейнеры (преобразование из генеральных грузов в контейнерные). Эти процессы показаны на рис. 7.

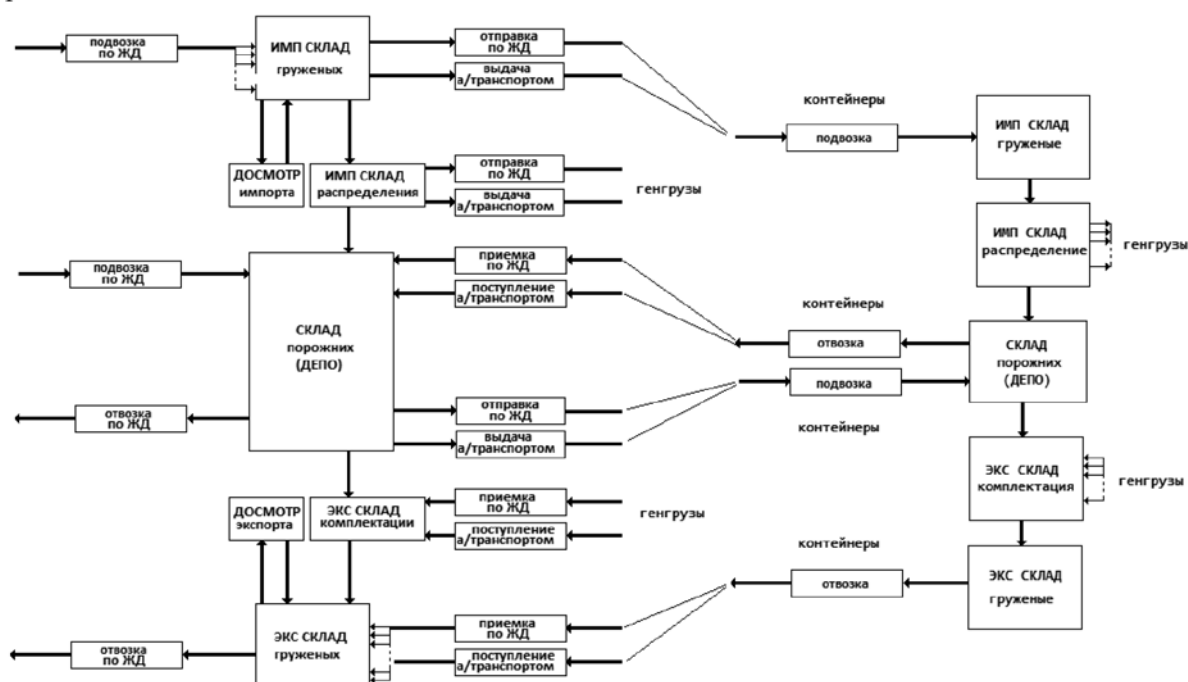


Рис. 7. Взаимодействие наземного и производственного терминалов

По аналогии с морскими и наземными терминалами функциональная модель грузопотоков такого «производственного» контейнерного терминала приведена рис. 8. Данная модель относится и к импортному терминалу (принимающему поток грузовых контейнеров и преобразующему его в генеральные грузы), и к экспортному терминалу (преобразующему генеральные грузы в контейнерные). В случае сугубо импортного или сугубо экспортного производственного терминала они выполняют лишь часть функций, обозначенных на рис. 8. Грузопотоки импортного и экспортного производственного контейнерного терминала приведены на рис. 9.

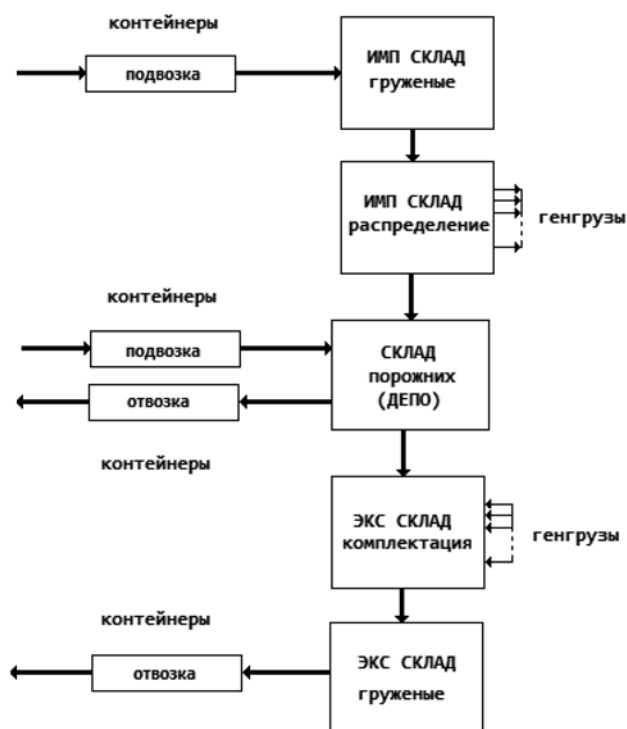


Рис. 8. Грузопотоки производственного контейнерного терминала

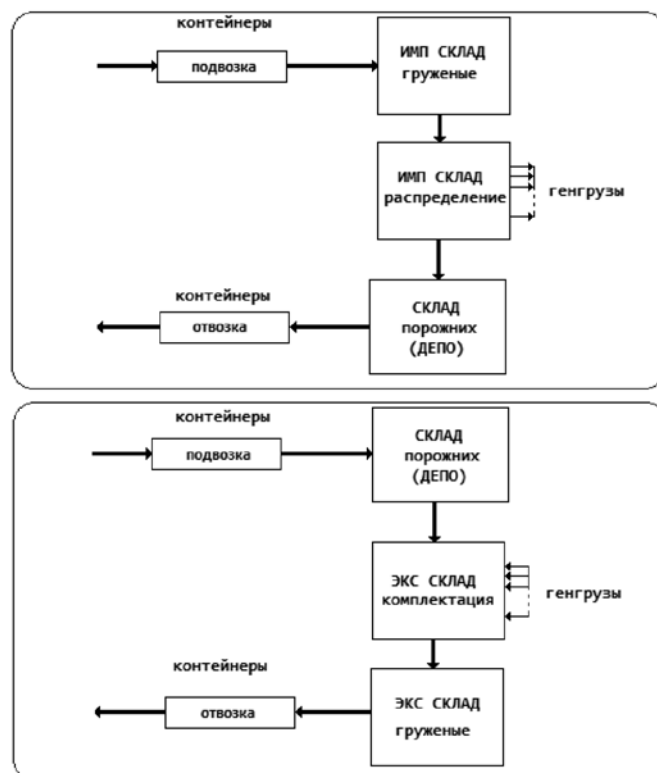


Рис. 9. Грузопотоки импортного и экспортного производственного терминала

Подвозка и отвозка контейнеров к производственному терминалу может осуществляться различными видами транспорта: железнодорожным, автомобильным, речным, что накладывает особенности на конфигурацию его основных элементов: грузовых фронтов, оборудования, подъездных путей и складов (рис. 10).

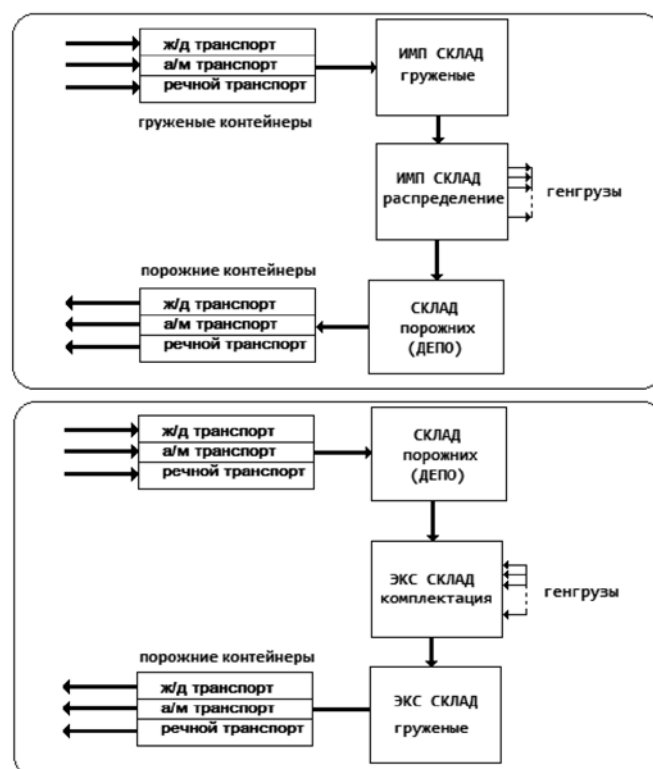


Рис. 10. Дифференциация производственных терминалов по видам транспорта

Производственные контейнерные порты. Рассмотренные ранее транспортно-логистические схемы и функциональные модели касались наиболее развитых цепей доставки груза. В то же время, подвозка к производственному терминалу может осуществляться также непосредственно морским транспортом: например, когда распределительный центр располагается на побережье или производство располагается в пределах территории морского порта. В этом случае производственный терминал приобретает статус *промышленного порта* в его традиционном понимании [13] – [15] — рис. 11.

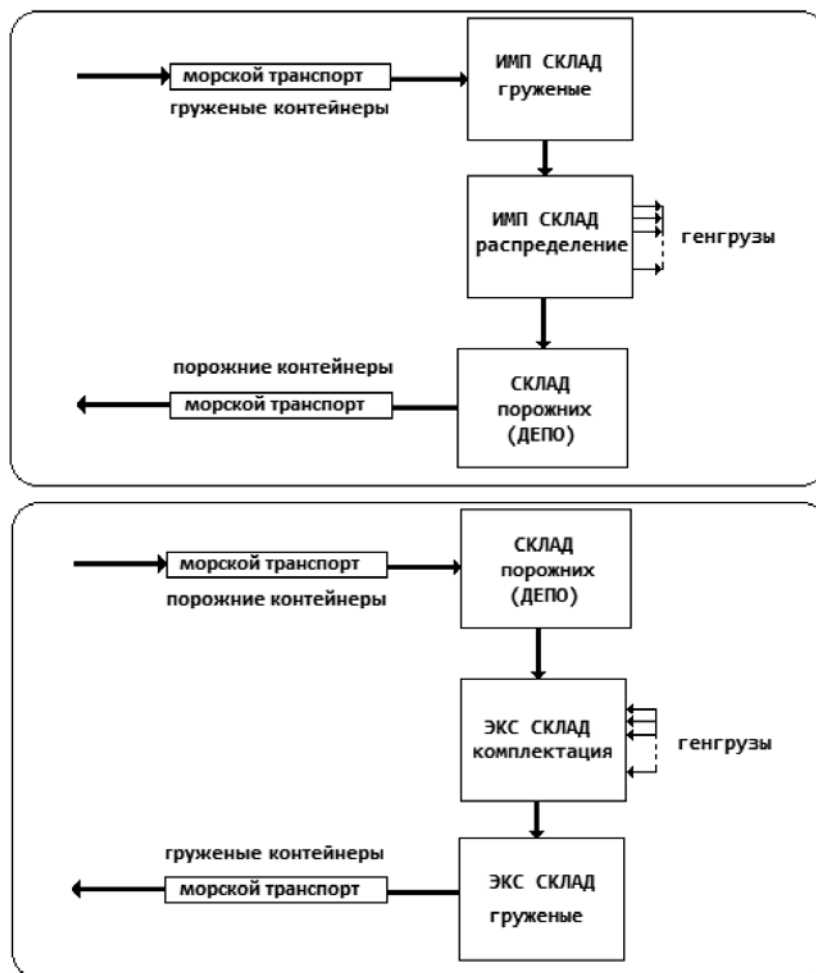


Рис. 11. Функциональная модель производственного контейнерного порта

Выводы

1. Проведенное исследование позволяет, в первую очередь, показать функциональные отличия контейнерных терминалов различных видов, подчеркивая при этом их технологическое единство.
2. Наличие и развитие единой (глобальной) эшелонированной контейнерной транспортно-технологической системы как материальной основы грузораспределения свидетельствует о том, что отдельные транспортные процессы в любых научных и проектно-конструкторских изысканиях необходимо рассматривать как элементы общей системы, т. е. во взаимосвязи и взаимозависимости.
3. Выполненная классификация терминалов (контейнерных площадок), определяющая изучаемый объект как подсистему, направлена на обеспечение учета связей и зависимостей между грузопотоками и терминальными операциями, что позволяет выполнять ожидаемые прогнозы перспектив развития отдельных инфраструктурных объектов.

4. Поскольку данный подход не позволяет в дальнейшем рассматривать порты как условно обособленные объекты, производство научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, как и последующие инвестиции в отношении морских портов оказываются бесперспективными без учета общесистемных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bird J. Seaports and seaports terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1971. — 240 p.
2. Bird J. Transport decision-makers speak: the Seaport Development in the European Communities Research Project — Part II / J. Bird // Maritime Policy and Management. — 1982. — Т. 9. — № 2. — С. 83–102.
3. Notteboom T. Port regionalization: towards a new phase in port development / T. Notteboom, J.-P. Rodrigue // Maritime policy and management. — 2005. — Vol. 32. — № 3. — Pp. 297–313.
4. Ляхницкий В. Е. Морские порты / В. Е. Ляхницкий. — М.: Государственное транспортное издательство, 1932. — 368 с.
5. Амбарян О. А. Устройство морских портов / О. А. Амбарян, Б. Ф. Горюнов, Л. Н. Белинская. — М.: Транспорт, 1987. — 272 с.
6. Погодин В. А. Гидротехнические сооружения морских портов: учеб. пособие / В. А. Погодин, В. С. Коровкин, К. Н. Шхинек, Ю. Н. Фомин, И. В. Лисовский, А. И. Альхименко. — 2-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2015. — 432 с.
7. Берсефорд А. Портовое развитие от перегрузки к логистическим центрам / А. Берсефорд, М. Брукс // Морская политика и управление. — 2004. — № 31. — С. 47–68.
8. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 18–20.
9. Кузнецов А. Л. Морские и сухопутные порты в новой мировой системе грузораспределения / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1. — С. 9–12.
10. Кузнецов А. Л. Механизмы рационализации маршрутов наземного распределения и выбора видов транспорта / А. Л. Кузнецов // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. — 2011. — № 6. — С. 31–34.
11. Кузнецов А. Л. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 1 (44). — С. 30–33.
12. Кириченко А. В. Взаимодействие города и порта: эволюция и перспективы / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1 (50). — С. 12–15.
13. Ермакова Е. А. Опыт классификации хинтерландов морских портово-промышленных комплексов / Е. А. Ермакова // Известия Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. — 2012. — № 3. — С. 57–63.
14. Кириченко А. В. Ретроспективный анализ развития торгово-промышленного судоходства / А. В. Кириченко, Е. С. Алексеева // Системный анализ и логистика. — 2013. — № 10. — С. 17–38.
15. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. А. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 141–153.

CLASSIFICATION AND FUNCTIONAL MODELING OF ECHELONED CONTAINER TERMINALS

This article presents the results of a study of functional characteristics and processes of different types of container terminals. It is shown that in the course of its development, seaports have changed not only cargo crossing technology, but also the geographical configuration. At present, the goods carried are consistently interacting chain terminals (container yards) performing the function of distribution of goods. Functional models are constructed for interacting container terminals differing in functions and operators. On this basis is made the classification of container terminals, as well as the overall architecture of the container echeloned transport-technological system. This approach does not allow in the future to consider ports as conditionally separate objects. Thus, the production of research and development work, as well as further investments in respect of seaports is hopeless without these factors.

Keywords: container terminal; container yard; classification; functional model; container echeloned transport-technological system.

REFERENCES

1. Bird J. *Seaports and seaports terminals*. London: Hutchinson University Library, 1971.
2. Bird, J. "Transport decision-makers speak: the Seaport Development in the European Communities Research Project — Part II." *Maritime Policy and Management* 9.2 (1982): 83–102.
3. Notteboom, T., and J.-P. Rodrigue. "Port regionalization: towards a new phase in port development." *Maritime Policy and management* 32.3(2005): 297–313.
4. Ljahnickij, V. E. *Morskijeporty*. M.: Gosudarstvennoe transportnoe izdatelstvo, 1932.
5. Ambarjan, O. A., B. F. Gorjunov, and L. N. Belinskaja. *Ustrojstvo morskikh portov*. M.: Transport, 1987.
6. Pogodin, V. A., V. S. Korovkin, K. N. Shhinek, Ju. N. Fomin, I. V. Lisovskij, and A. I. Alhimenko. *Gidrotehnicheskie sooruzhenija morskikh portov: Uchebnoe posobie, 2-e izd., ster.* SPb.: Izdatelstvo "Lan", 2015.
7. Berseford, A., and M. Bruks. "Portovoe razvitie ot peregruzki k logisticheskim centram." *Morskaja politika i upravlenie* 31 (2004): 47–68
8. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. "Basic model of logistical flows through container terminal." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
9. Kuznetsov, A. L. "Sea and dry ports in the new world cargo distribution system." *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (2009): 9–12.
10. Kuznetsov, A. L. "Mechanisms of rationalization of the routes of land distribution and choice of transport type." *TRANSPORT: Science, Technology, Management* 6 (2011): 31–34.
11. Kuznetsov, A. L., Ya. Ya. Eglit, and A. V. Kirichenko. "On the issue of organising the operation of a transport hub." *Transport Rossijskoj Federacii* 1(44) (2013): 30–33.
12. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. "Interrelations between cities and ports: evolution and perspectives." *Transport Rossijskoj Federacii* 1(50) (2014): 12–15
13. Ermakova, E. A. "Opyt klassifikacii hinterlandov morskikh portovo-promyshlennykh kompleksov." *Izvestija Sankt-Peterburgskogo universiteta jekonomiki i finansov* 3 (2012): 57–63.
14. Kirichenko, A. V., and E. S. Alekseeva. "Retrospektivnyj analiz razvitija trgovno-promyshlennogo sudohodstva." *Sistemnyj analiz i logistika* 10 (2013): 17–38.
15. Kuznetsov, A. L., and A. A. Galin. "The genesis of port development models in modern transportation science." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2(30) (2015): 141–153.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_pgt@gumrf.ru
Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
KirichenkoAV@gumrf.ru
Давыденко Александр Александрович —
кандидат экономических наук.
Федеральное агентство морского и речного
транспорта
kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Aleksandr Lvovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_pgt@gumrf.ru
Kirichenko Aleksandr Viktorovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
KirichenkoAV@gumrf.ru
Davydenko Aleksandr Aleksandrovich —
PhD.
Federal Agency of Sea and Inland Water Transport
kaf_pgt@gumrf.ru

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТА РАСШИРЕНИЯ ПАНАМСКОГО КАНАЛА НА МИРОВОЕ СУДОХОДСТВО

Рассмотрены вопросы, касающиеся реализации проекта расширения Панамского канала как одного из наиболее масштабных и амбициозных инфраструктурных проектов на транспорте. Проанализированы прогнозы кардинального изменения сложившейся структуры марирутов морской транспортировки в мире с вводом в действие данного проекта. Отмечаются различные факторы техногенного и социального характера, явившиеся причиной сомнений относительно размера коммерческой эффективности вложенных в данный проект инвестиций, и выполнен соответствующий анализ, являющийся целью настоящей публикации. В первую очередь, рассмотрено влияние расширения канала на транспортную систему США. Выполнено сравнение возможностей водного пути и «сухопутного коридора». Рассмотрена система конкурентных мер морских портов, специализирующихся на передаче грузов железнодорожному транспорту. Спрогнозированы особенности возможного передела рынка транспортных услуг.

Ключевые слова: мировое судоходство, Панамский канал, глобальная цепь поставки, перевозки контейнерных грузов.

ПРОЕКТ расширения Панамского канала (рис. 1 и 2), который был запущен в сентябре 2007 г., планировалось завершить в 2014 г. В течение всего этого времени защитники проекта утверждали, что он окажет революционное влияние на все остальные проекты развития мировой инфраструктуры контейнерной транспортной системы [1] – [5]. Многие эксперты считали, что ввод в строй нового канала приведет к наиболее значимым изменениям в торговом мореплавании после внедрения контейнеризации в 1950-х гг. [6] – [8].

Реализация проекта, стоимость которого оценивалась в 5,5 млрд долл. США должен был, позволить, практически, в три раза увеличить вместимость судов, проходящих по Панамскому каналу — от 4500 TEU до 12 600 TEU (рис. 3). Он предусматривал строительство новых шлюзов на обоих побережьях, улучшение навигационных условий в существующих руслах, совершенствование системы питания водой и увеличение проходной осадки. Как у всех проектов подобного рода, в процессе работы возникали проблемы с выделением земель для дальнейшего развития, перепланировкой дорожной сети, вызванные противодействием экологов, тропическими ливнями, трудовыми спорами и забастовками.

По мере приближения к дате окончания проекта, срок ввода в строй нового канала постепенно удалялся, появлялись различные технические проблемы, такие как протекание стенок шлюзовых камер, возникали новые сомнения. Главный вопрос, вызывающий беспокойство специалистов, состоял в том, насколько эффективно порты вне Панамского канала будут способны обрабатывать большие по вместимости суда, а их хинтерленд — справляться с возросшим трафиком [9] – [11].

Следует отметить, что проект расширения Панамского канала, в первую очередь, затронет транспортную систему США, открыв возможности для появления новых маршрутов, моделей распределения и формирования логистических хабов (рис. 4). Сегодня самый быстрый и наиболее популярный способ доставки грузов из Китая на Восточное побережье США (например, из Шанхая в Нью-Йорк) занимает 19 – 22 сут при использовании схемы судно – железная дорога (*landbridge*). При доставке только морем через Панамский канал этот же груз будет доставлен через 25 — 26 сут, использование Суэцкого канала потребует 27 – 28 сут. По этой причине около 75 % грузоотправителей из Юго-Восточной Азии пользуются маршрутом через Западное побережье, причем терминалы Лос-Анжелес / Лонг-Бич переваливают более 40 % этого объема. Панамским каналом пользуются лишь 19 % грузоотправителей.

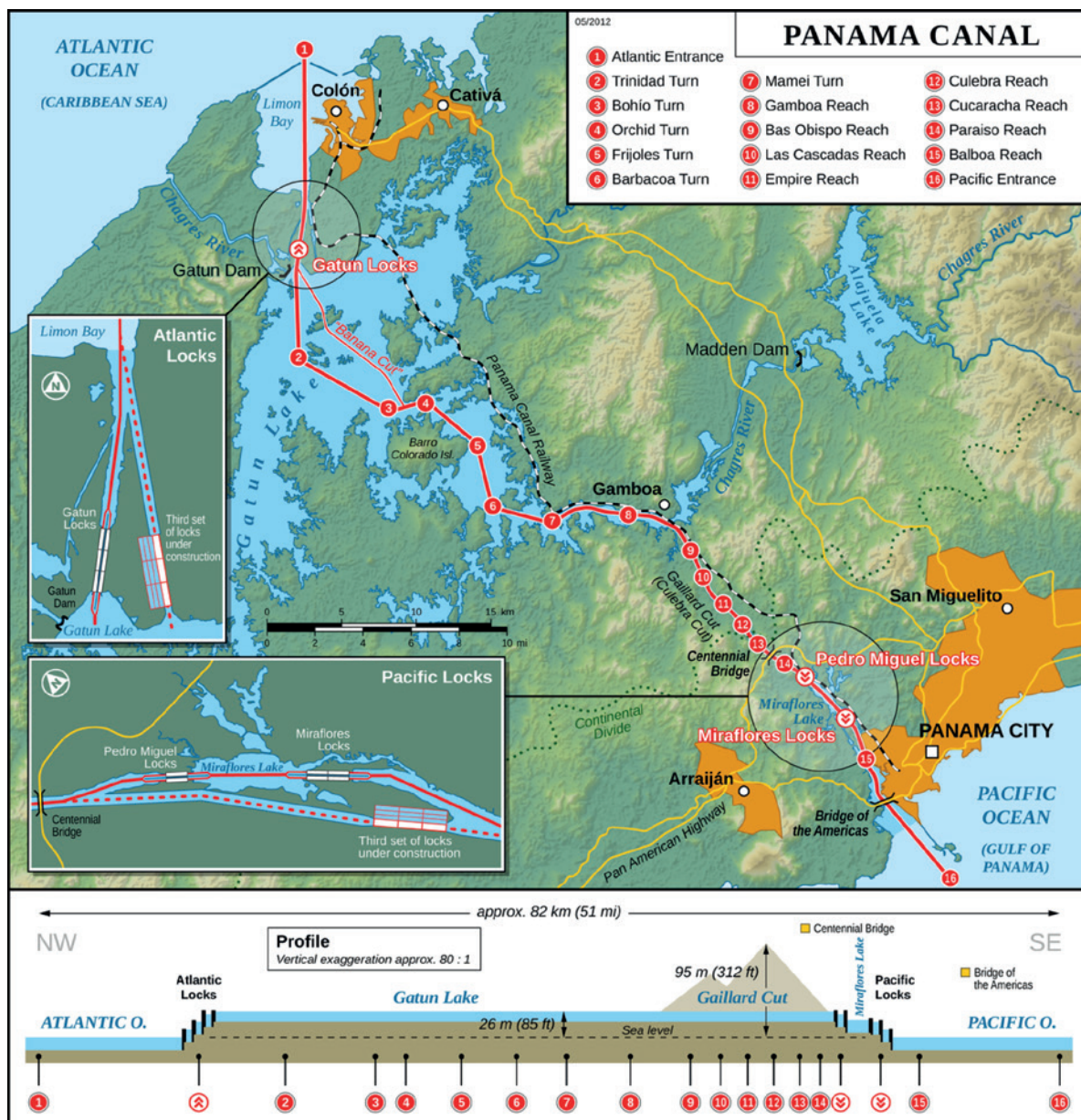


Рис. 1. Общая схема Панамского канала (источник: <http://masterok.livejournal.com/1052874.html>)

С открытием нового канала суда, которые сегодня относятся к стандарту «Post-Panamax» и не могут проходить через существующий канал, они будут иметь возможность напрямую заходить в порты Восточного побережья, тем самым предположительно снижая стоимость доставки. Однако использование схемы судно – железная дорога позволит все равно сократить сроки перевозки.

Прогнозы ожидаемых изменений в трафике разнятся очень сильно. Большая часть экспертов склоняется к тому, что морские перевозки увеличатся от 20 % до 35 %. Безусловно, все это будет зависеть и от уровня сборов, накладываемых администрацией Панамского канала. Сегодня они составляют 72 долл. США за слот, и проход по каналу судна вместимостью 4500 TEU обходится ему в 324 000 долл. США, груженого или порожнего. Ожидается, что администрация будет сегментировать рынок перевозчиков по их платежеспособности, тем самым максимизируя объемы судооборота и доходы от него. В ожидании возможности «перехватить» этот добавочный объем перевозок, практически все крупные порты Восточного побережья и Мексиканского залива проводят дноуглубление, развивают железнодорожные подходы и причальные мощности. Даже порт

Норфолк в Виргинии, имеющий глубину 15 м и являющийся сегодня единственным портом, способным принимать суда «Post-Panamax», озабочен совершенствованием средств навигации в порту для обеспечения более удобного подхода. Остальные порты: Чарльстон (Южная Каролина), Нью-Йорк / Нью-Джерси, Тампа, Майами, Саванна и др., активно расширяют территории, строят новые подъездные пути, увеличивают высоту пролета мостов и проводят дноуглубительные работы. Все эти усилия могут квалифицироваться как слишком масштабные инвестиции в погоне за слишком малым объемом грузопотока.

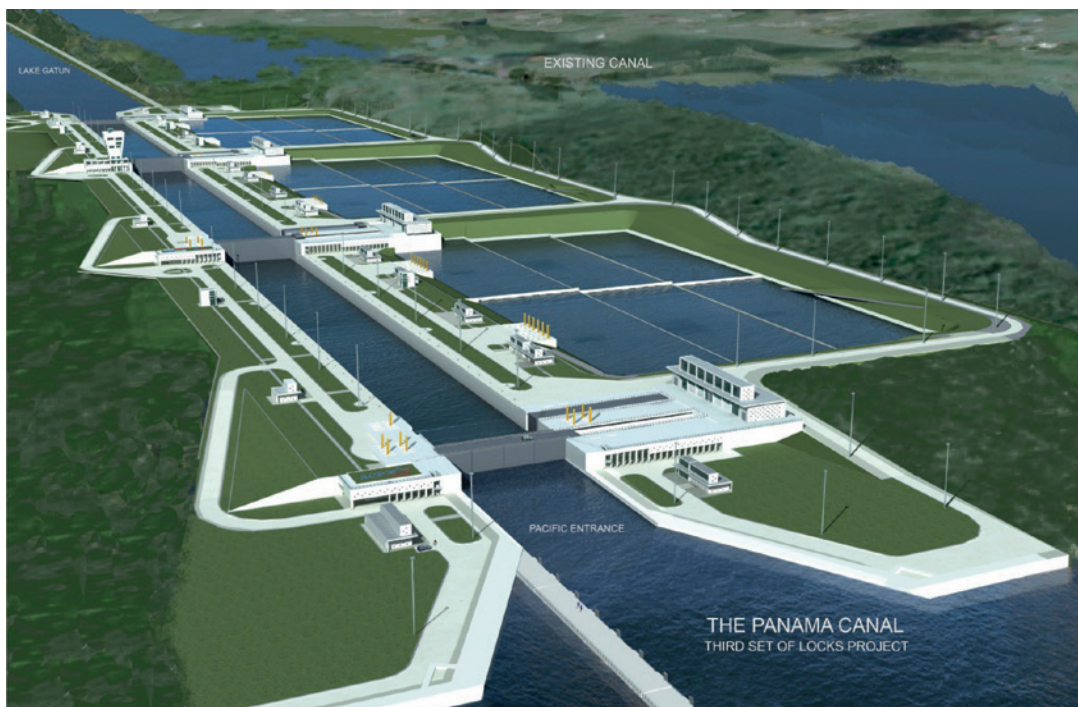


Рис. 2. Проект реконструкции шлюзов (источник: <http://masterok.livejournal.com/1052874.html>)

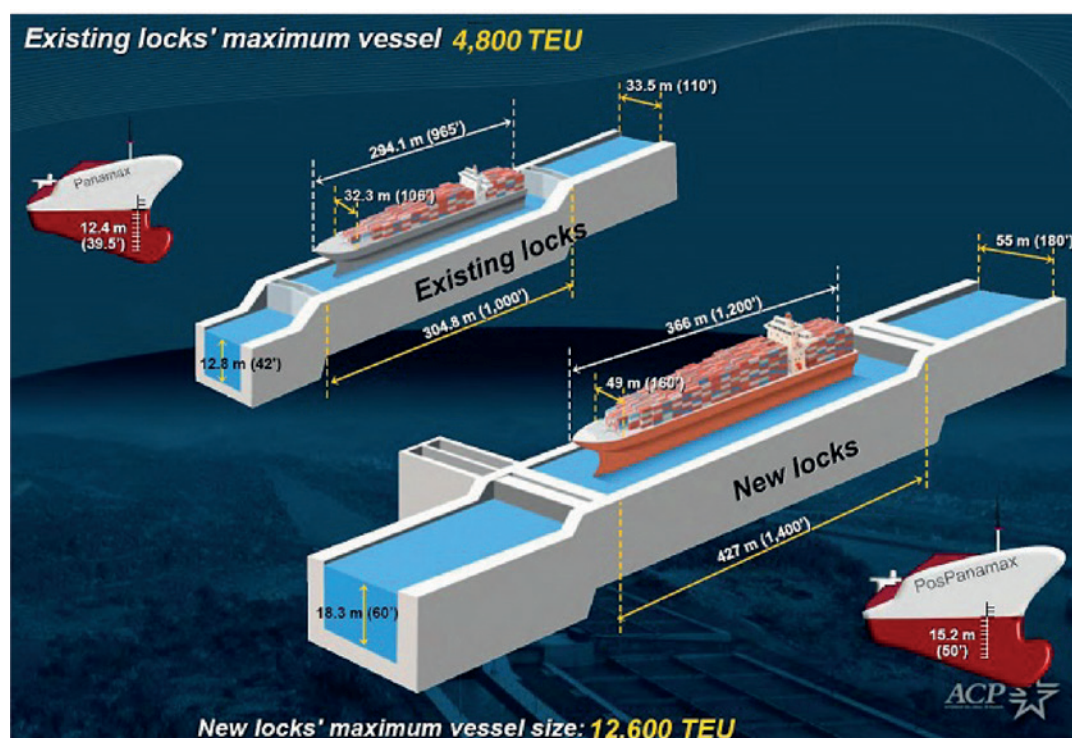


Рис. 3. Сравнительные размеры шлюзовых камер старого и нового канала (источник: <http://masterok.livejournal.com/1058784.html?page=1>)

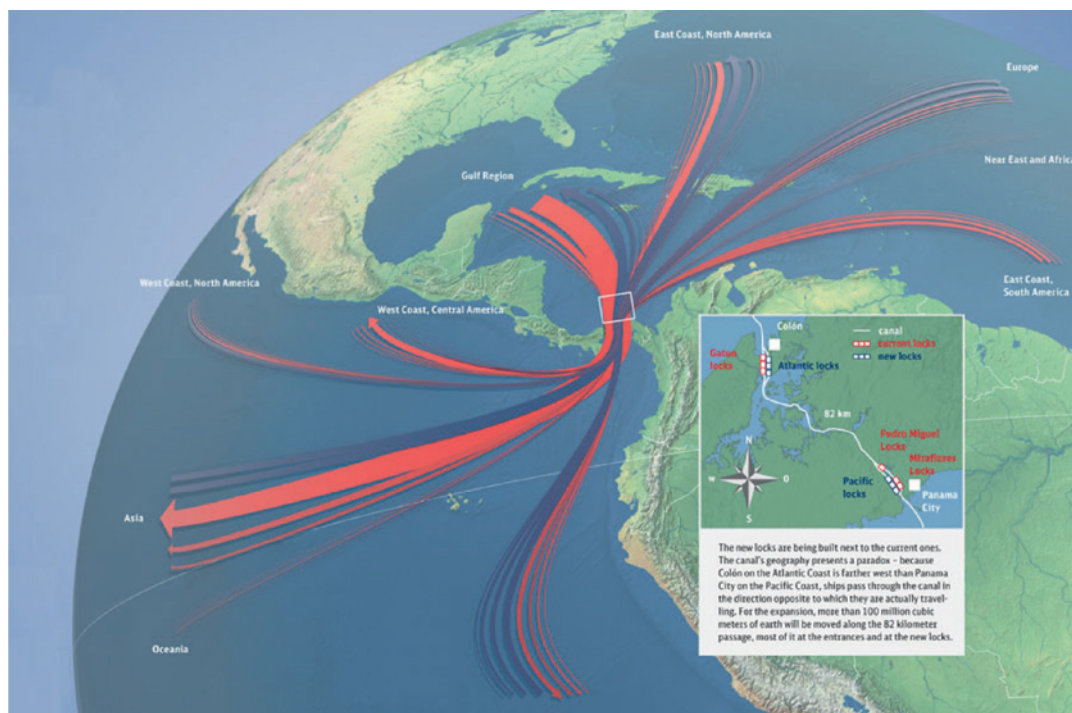


Рис. 4. Грузопотоки через Панамский канал.

Источник: http://www.logistics.dbschenker.ee/log-ee-en/news_media/news/3262682/panamacanal.html

Для реализации оптимистических ожиданий в отношении увеличения трафика судов класса «Post-Panamax» необходимо принимать во внимание следующие важные факторы.

Во-первых, необходимо учитывать оборонительные действия игроков рынка. Некоторые порты Восточного побережья (Лос-Анжелес, Лог-Бич, Окленд, Сиэтл, Такома) уже достигли соглашения с западными железными дорогами, в основном с БНСФ Рэйлвей и «Юнион Пасифик» об образовании коалиции Западного побережья США с целью гарантии конкурентных цен и уровня услуг для портов Западного побережья.

Во-вторых, при уходе части трафика из портов и переключении его на канал, нагрузка на порты заметно снизится, а их эффективность настолько же возрастет. Сопутствующее улучшение качеств услуг привлечет грузоперевозчиков к существующему мультимодальному варианту, тем самым ухудшая прогнозы долгосрочного роста объемов перевозки через канал.

В-третьих, несмотря на заявления администрации канала и правительства Панамы о том, что целью проекта являлось увеличение объема транshipmentа и сопутствующих логистических операций в стране, этот рост вовсе не гарантирован. Многие порты региона, включая вновь появившиеся на рынке порты Кубы, с нетерпением ждут возможности заняться перевалкой груза с судов «Post-Panamax» на малые суда, которые могут заходить в порты Восточного побережья.

В-четвертых, экологические соображения и цены на квоты эмиссий углекислого газа также могут подтолкнуть к выбору маршрутов на Западном побережье. Причина заключается в том, что эмиссия CO₂ в пересчете на TEU при доставке большими судами «Panamax» в порты Западного побережья и использовании железной дороги для наземного распределения составляют в среднем лишь 2/3 от эмиссии, связанной с прохождением Панамского канала в порты Восточного побережья.

Таким образом, несмотря на то, что проект расширения Панамского канала имел целью обеспечить его доминирование в качестве транспортного маршрута, эта цель не может считаться гарантированно достигнутой. Соответствующие власти должны разработать эффективную стратегию, которая будет способствовать появлению инициатив со стороны бизнеса, установлению конкурентных цен и прочих условий для привлечения судоходства на таком уровне, кото-

рый бы оправдал огромные затраты и трудоемкость проекта. Эта стратегия должна обеспечить рост сотрудничества между администрацией канала, портовыми операторами Атлантического побережья, Восточными железными дорогами, региональными и государственными властями. Как следствие, очень сложно предсказать последствия расширения Панамского канала. Очевидно, что его реализация будет способствовать росту конкуренции между портами и судоходными линиями, что приведет к безусловному выигрышу для грузоотправителей. Атлантическое побережье может испытать некоторый рост объемов перевалки, но он, скорее всего, будет меньше ожидаемого по оптимистическим сценариям, которые были заложены в планы инвестиций в развитие портов США.

Тем не менее, глобальный проект расширения Панамского канала может отразиться незначительно на мировой и, в частности, Европейской контейнерной транспортной системе. Как видно из рис. 5 и следует из ранее изложенного, основные изменения будут затрагивать сегмент торговли Юго-Восточной Азии — США. В некоторой части это, возможно, коснется транзитного направления Юго-Восточная Азия — Европа, выполняемого сегодня с помощью схемы судно – железная дорога (*landbridge*). Оно может проявиться в увеличении доли судов класса «Post-Panamax», не стоящих сегодня на этом направлении. В то же время, это увеличение не окажет принципиального влияния на порты Северной и Южной Европы, уже сегодня работающие с крупнейшими судами на торговом направлении Юго-Восточная Азия — Европа.

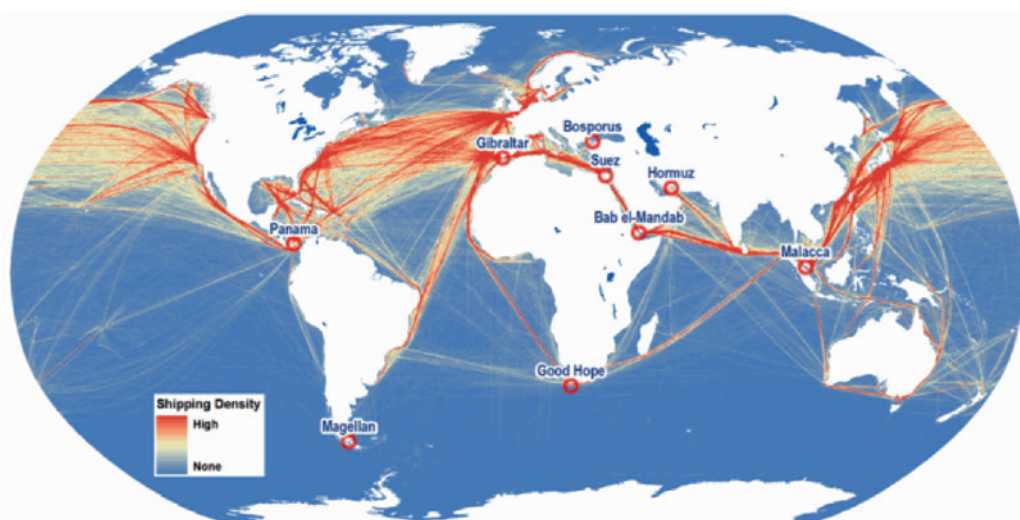


Рис. 5. Мировая система грузопотоков
(источник: <http://iv-g.livejournal.com/1135065.html>)

Возможным вторичным проявлением ввода в строй проекта может оказаться эффект каскадного обрушения тоннажа, который проявится в высвобождении судов класса «Panamax» для работы на направлениях, использующих в настоящее время суда «Sub-Panamax», которые, в свою очередь, могут потеснить фидерные суда. Этот эффект, однако, может быть существенно демпфирован выводом из эксплуатации старых судов.

Выводы

1. Проект расширения Панамского канала является одним из самых крупных инфраструктурных транспортных проектов нынешнего столетия.
2. Масштабы инвестиций в проект предполагают соответствующие масштабы доходов от его эксплуатации.
3. Основания, которыми руководствовались участники проекта, представляются достаточно спорными и недоказанными, что заставляет рассматривать его как проект, связанный со значительным коммерческим риском.

4. Влияние ввода в строй расширенного канала вызовет передел сегмента рынка морских перевозок, участниками которого являются компании, работающие на направлении Юго-Восточная Азия — США, несмотря на то, что здесь это влияние может быть ослаблено различными факторами.

5. Крупные изменения в мировой системе судоходства маловероятны, особенно в условиях наблюдающейся в настоящее время нестабильности экономической и геополитической ситуации.

6. Коммерческая эффективность этого грандиозного проекта остается сомнительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. American Association of Ports Authorities. Port Industry Statistics: North American Port Container Traffic, 2012. — 143 p.
2. National Rail Freight Infrastructure Capacity and Investment Study. — Cambridge Systematics, 2007. — 78 p.
3. Le-Griffin H. D. Container terminal productivity: Experiences at the ports of Los Angeles and Long Beach / H. D. Le-Griffin, M. Murphy // NUF Conference. — 2006. — Pp. 1–21.
4. Leachman R. C. Port and modal allocation of waterborne containerized imports from Asia to the United States / R. C. Leachman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2008. — Vol. 44. — № 2. — Pp. 313–331. DOI:10.1016/j.tre.2007.07.008
5. Luo M. A spatial-economic multimodal transportation simulation model for US coastal container ports / M. Luo, T. A. Grigalunas // Maritime Economics & Logistics. — 2003. — Vol. 5. — № 2. — Pp. 158–178.
6. The Tioga Group, Inc., Containerized Intermodal Goods Movement Assessment, Report, 2013 [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: <http://tiogagroup.com/> (дата обращения: 14.09.2015).
7. Морская администрация США. [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: http://marad.dot.gov/library_landing_page/data_and_statistics/Data_and_Statistics.htm (дата обращения: 14.09.2015).
8. Wilson W. W. Container Shipping: Rail and Ocean Shipping Rates / W. W. Wilson, B. Dahl // Report. — North Dakota State University, 2008. — 25 p.
9. Wilson W. W. Analysis of Container Flows: World Trade, US Waterborne and Commerce and Rail Shipments in North American Markets / W. W. Wilson, D. Benson // Report. — North Dakota State University, 2008. — 28 p.
10. Wilson W. W. Optimization Models of Container Shipments in North America: Spatial Competition and Projections / W. W. Wilson, E. De Vuyst // Report. — North Dakota State University, 2008. — 31 p.
11. Rivera L. Logistics: Shipping on the Panama Canal / L. Rivera, Y. Sheffi [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.americasquarterly.org/node/2455> (дата обращения: 23.09.2015).

ASSESSMENT OF THE POSSIBLE INFLUENCE OF THE PANAMA CANAL EXPANSION ON THE GLOBAL SHIPPING

The issues relating to the implementation of the expansion project of the Panama Canal as one of the largest and most ambitious infrastructure projects in transport. Analyzed forecasts a fundamental change in the existing structure of sea transportation routes in the world with the introduction of the project. There have been a variety of factors of anthropogenic and social issues, which were the reason for doubt about the size of the commercial effectiveness of investment in the project investment, and take the appropriate analysis, which is the purpose of this publication. The first examined the impact of expansion of the channel on the transport system of the United States. Comparison of features of the waterway and the railway “landbridge”. The article analyzes the system of competitive action seaports specializing in the transfer of goods by rail. The forecast features redistribution of the market of transport services.

Key words: world shipping, Panama Canal, global supply chain, container transportation.

REFERENCES

1. American Association of Ports Authorities. Port Industry Statistics: North American Port Container Traffic. 2012.

2. National Rail Freight Infrastructure Capacity and Investment Study. — Cambridge Systematics, 2007.
3. Le-Griffin, H. D. Container terminal productivity: Experiences at the ports of Los Angeles and Long Beach / H. D. Le-Griffin, M. Murphy // *NUF Conference*. — 2006. — Pp. 1–21.
4. Leachman, R. C. “Port and modal allocation of waterborne containerized imports from Asia to the United States.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44.2(2008): 313–331. DOI:10.1016/j.tre.2007.07.008
5. Luo, M., and T. A. Grigalunas. “A spatial-economic multimodal transportation simulation model for US coastal container ports.” *Maritime Economics & Logistics* 5.2(2003): 158–178.
6. The Tioga Group, Inc., Containerized Intermodal Goods Movement Assessment, Report, 2013. Web. 14 Sept. 2015 <<http://tiogagroup.com/>>.
7. U.S. Department of Transportation, U.S. Water Transportation Statistical Snapshot. 2012. United States. Marine Administration. Web. 14 Sept. 2015 <http://marad.dot.gov/data_and_statistics/Data_and_Statistics.htm>.
8. Wilson, W. W., and B. Dahl. *Container Shipping: Rail and Ocean Shipping Rates*. Report. North Dakota State University, 2008.
9. Wilson, W. W., and D. Benson. *Analysis of Container Flows: World Trade, US Waterborne and Commerce and Rail Shipments in North American Markets*. Report. North Dakota State University, 2008.
10. Wilson, W.W. and E. DeVuyst. *Optimization Models of Container Shipments in North America: Spatial Competition and Projections*. Report. North Dakota State University, 2008.
11. Rivera, L., and Y. Sheffi. *Logistics: Shipping on the Panama Canal*. Web. 23 Sept. 2015 <<http://www.americasquarterly.org/node/2455>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русинов Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
RusinovIA@gumrf.ru
Эглит Ян Янович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
JeglitJJ@gumrf.ru
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusinov Igor Aleksandrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
RusinovIA@gumrf.ru
Jeglit Jan Janovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
JeglitJJ@gumrf.ru
Kolosov Mihail Aleksandrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
kaf_gsk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2015 г.

УДК 656.61.052

С. В. Смоленцев

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННОЙ СИТУАЦИИ В МОРЕ

В статье рассматривается проблема безопасности мореплавания, для решения которой разрабатывается автоматизированная система расхождения судов в море. Важным компонентом этой системы является модуль навигационной ситуации. Оценка навигационной ситуации проводится на основе прогноза траекторий движения собственного судна и судов-целей. При этом учитывается как риск столкновения с судами в районе плавания, так и наличие навигационных опасностей и ограничений. Разработана шкала опасности и предложена система правил для оценки степени опасности каждого из судов-

целей. Для оценки опасности столкновения с судном-целью используются параметры сближения судов: время, дистанция и скорость кратчайшего сближения. Представлена продукционная система, которая для каждого из судов-целей определяет оценку опасности столкновения в терминах предложенной шкалы опасности. На основе оценки опасности каждого из судов строится комплексная оценка безопасности навигационной обстановки.

Ключевые слова: система расхождения судов, оценка навигационной ситуации, риск столкновения.

ПРОБЛЕМА безопасности мореплавания имеет множество аспектов, одним из которых является обеспечение безопасности расхождения судов в море. Сейчас проблемами предупреждения столкновений занимаются специалисты различных видов транспорта, но наибольшие успехи в этой области достигнуты в авиации с использованием Traffic alert and Collision Avoidance System (TCAS). Разработкой судовых систем предупреждения столкновений V-CAS Vessel Collision Avoidance System в настоящее время заняты специалисты различных компаний. В частности, известно решение компании Totem в виде подключаемого к ECDIS модуля Decision Support Tool.

Для решения проблемы предупреждения столкновений в 1972 г. была принята «Конвенция о международных правилах предупреждения столкновений судов в море», приложением к которой, собственно, и являются Правила МППСС-72 [1] (далее — МППСС). Выполнение МППСС является обязательным для гражданских судов. Однако применение этих правил не гарантирует безопасности мореплавания, поскольку МППСС не учитывают навигационных ограничений в районе плавания, регламентируют расхождение двух судов, но не применимы в случае встречи нескольких судов. Таким образом, использование только МППСС не позволяет обеспечить безопасность мореплавания в узкостях, где в настоящее время скапливаются большие судовые потоки.

В условиях большого количества окружающих судов-целей судоводитель физически не может самостоятельно оценить навигационную обстановку и принять правильное решение по управлению своим судном. Решением данной проблемы является создание автоматизированной системы предупреждения столкновений судов. Рассмотрение различных аспектов подобных систем содержится в литературе [2] – [9]. В статье [10] рассматриваются принципы работы и архитектура разрабатываемой автоматизированной системы расхождения судов, одним из подсистем которой является подсистема оценки навигационной ситуации. Основной задачей, решаемой данной подсистемой, является задача комплексной оценки текущей навигационной ситуации, включая оценку опасности столкновения с другими судами, выходом на мелководье и т.п.

В автоматизированной системе генерируется последовательность векторов навигационной ситуации:

$$S = \{S_t\}_{t \in [-T, 0]},$$

где T — глубина истории (количество хранимых векторов навигационных ситуаций);

S_t — вектор навигационной ситуации,

$$S_t = \langle S_t^c, S_t^f, S_t^e, S_t^d \rangle.$$

Здесь S_t^c — текущая навигационная ситуация; S_t^f — прогноз навигационной ситуации; S_t^e — оценка навигационной ситуации; S_t^d — решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

В данной статье рассматриваются основные принципы формирования одной из компонент вектора навигационных ситуаций, а именно компоненты оценок S_t^e . Для оценки навигационной ситуации используется информация о районе плавания, которая может быть получена от судовой ECDIS. Кроме того, необходимо формировать прогноз развития ситуации на заданный промежуток времени.

Компонента оценок может быть представлена в следующем виде:

$$S_i^e = \langle e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J} \rangle = E(S_i^f, \mathbf{R}, K_e),$$

где S_i^f — вектор прогноза навигационной ситуации (динамическая составляющая); $\mathbf{R}$ — информация о районе плавания, маршруте судна и т.п. (статическая составляющая); K_e — когнитивная составляющая оценки (знания о возможных оценках различных навигационных ситуаций).

Для построения вектора прогноза навигационной ситуации S_i^f используются прогнозные траектории движения как собственного судна, так и окружающих его судов:

$$S_i^f = \langle Tr_0, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle = F(\mathbf{S}_{-1}, \mathbf{R}, M, K_f),$$

где Tr_0 — прогноз траектории собственного судна; Tr_j — прогноз траектории j -го судна-цели; M — множество моделей динамики судов (собственного судна и судов-целей); $\mathbf{S}_{-1} = \{S_i\}_{i \in [-T, -1]}$ — последовательность векторов предыдущих навигационных ситуаций; K_f — когнитивная составляющая (знания о возможных вариантах построения прогнозов траектории судна с учетом навигационных и иных ограничений).

Каждая из траекторий (как собственного судна, так и судов-целей) прогнозируется с использованием модели динамики данного судна. Для собственного судна модель динамики хорошо известна и выбирается в зависимости от загрузки судна (груз / балласт). Модель динамики судна-цели выбирается из базы данных таких моделей в соответствии с информацией о типе судна и его характеристиках, которая может быть получена из сообщений АИС, принимаемых системой от каждого судна. Кроме того, для построения прогноза траекторий используется информация о заданных маршрутах движения судов. Для собственного судна планируемый маршрут известен и может быть введен в систему заранее или получен от судовой ECDIS. С заданными маршрутами движения судов-целей подобной однозначности нет. В системе АИС существует возможность передачи планируемого маршрута, но как показывает практика, эта функциональность в настоящее время не задействована. Поэтому проблема прогнозирования маршрутов движения судов-целей пока остается открытой. Таким образом, прогнозируемая навигационная ситуация включает в себя прогноз траекторий собственного судна и судов-целей относительно друг друга и навигационных опасностей и ограничений.

При построении оценки опасности данной ситуации принимаются во внимание следующие риски:

- выход в зоны, запретные для плавания,
- пересечение границ СРД (систем разделения движения),
- выход на навигационные опасности,
- выход на мелководье,
- столкновение с каким-либо судном.

По информации от судовой ECDIS возможно получение множества стационарных объектов, в число которых входят навигационные опасности, зоны мелководья, запретные для плавания зоны, границы СРД и др. Зоны мелководья определяют с учетом заданной судоводителем безопасной глубины. Для каждого объекта из этого множества формируются параметры его опасности для прогнозируемой траектории движения собственного судна. В качестве таких параметров используются время и дистанция кратчайшего сближения с соответствующей опасностью. Таким образом, для множества стационарных объектов L получим следующее множество параметров оценок риска:

$$P^N = \{P_l^N\}_{l \in L};$$

$$P_l^N = \langle D_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l), T_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l) \rangle.$$

Оценка риска столкновения с динамическими объектами (судами-целями) проводится с использованием прогнозируемых траекторий собственного судна и каждого из судов-целей. Для оценки уровня опасности столкновения используются стандартные параметры сближения: время и дистанция кратчайшего сближения. Таким образом, для множества судов-целей J получим следующее множество параметров оценок риска:

$$P^s = \{P_j^s\}_{j \in J};$$

$$P_j^s = \langle D_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j), T_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j) \rangle.$$

Общее множество параметров риска получим, объединив приведенные ранее множества:

$$P = P^s \cup P^N = \{P_i\}_{i \in I}.$$

Отдельной задачей является задача построения оценки степени опасности каждого из объектов (стационарного или динамического) на основе полученных параметров. Данная оценка должна не только характеризовать степень опасности того или иного объекта в прогнозируемом промежутке времени, но и быть интуитивно понятной и удобной для восприятия судоводителем. В качестве удобной и естественной шкалы степени опасности предложено использовать шкалу RYG = <RED><YELLOW><GREEN>, в которой используются три категории:

<RED> (опасно) — объект из этой категории является опасным и необходимо предпринять действия по управлению судном, целью которых будет такое изменение траектории движения собственного судна, которое позволит вывести данный объект из этой категории;

<YELLOW> (внимание) — объект из этой категории не является опасным, но траектория собственного судна проходит вблизи данного объекта или траектории его движения и необходимо следить за возможным изменением условий или траектории данного объекта, которые могут привести этот объект в категорию <RED>;

<GREEN> (безопасно) — объект из данной категории не является опасным.

Предложенная маркировка окружающих судно объектов (как статических, так и динамических) с помощью разработанной цветовой шкалы является весьма наглядной и удобной для восприятия судоводителем.

Отнесение каждого из объектов к той или иной категории по шкале RYG, т.е. оценка степени опасности этого объекта, проводится с помощью продукционной (интеллектуальной) системы, основанной на правилах. Однако все правила в данной системе являются параметрическими, т.е. они зависят от параметров, которые задаются судоводителем:

D^* — радиус опасной зоны (сближение на дистанцию, меньшую этой величины, считается опасным);

$D^{**} > D^*$ — радиус зоны усиленного внимания (сближение на дистанцию менее D^{**} , но более D^* считается потенциально опасным и требует внимания со стороны судоводителя);

T^* — максимальное время опасного сближения (большее время кратчайшего сближения не считается опасным).

Эти параметры могут быть различными в разных навигационных ситуациях и задаются судоводителем в соответствии с текущими условиями плавания, характеристиками собственного судна, близостью навигационных опасностей, погодными условиями и любыми другими соображениями. В зависимости от значения этих параметров изменяются размеры опасных зон вокруг собственного судна.

Продукционная система определения степени опасности объектов преобразует параметры оценок риска (D_{ki} — дистанция кратчайшего сближения и T_{ki} — время кратчайшего сближения) в оценку по шкале RYG по следующим правилам:

$$(D_{ki} > D^{**}) \rightarrow Q_i = G;$$

$$(D_{ki} > D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = G;$$

$$(D_{ki} > D^*) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (T_{ki} > T^*) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = Y;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \rightarrow Q_i = R.$$

С использованием приведенной системы правил выполняется оценка степени опасности каждого статического и динамического объекта (навигационных опасностей и судов-целей):

$$e(Tr_0) = \min(Q_l), l \in L;$$

$$e(Tr_0 \circ Tr_j) = Q_j, j \in J.$$

Результирующая оценка степени опасности навигационной ситуации определяется по минимальной (наиболее опасной) оценке:

$$S_i^e = \min(e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J}).$$

Изложенная в статье методика не только позволяет наглядно представить судоводителю оценку опасности текущей навигационной ситуации, но и определить какие из объектов (навигационные опасности или окружающие суда-цели) являются наиболее опасными, требующими решения задачи по расхождению.

Таким образом, в ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

1. Предложена шкала RYG (<RED> <YELLOW> <GREEN>). Представление степени опасности как отдельных судов-целей, так и комплексной оценки навигационной ситуации в категориях данной шкалы является с одной стороны достаточно простой, а с другой — весьма информативной и наглядной для судоводителя. Такая оценка является предпочтительной по сравнению с численной оценкой степени опасности.

2. Разработаны общие принципы оценки риска столкновения с судами-целями, а также навигационными опасностями, выхода на мелководье, пересечения границ СРД, входа в запретные для плавания зоны и др., основанные на использовании прогнозов траекторий собственного судна и судов-целей.

3. Предложена продукционная система, позволяющая строить оценки степени опасности столкновения с судами-целями. С помощью этой системы измеренные параметры кратчайшего сближения (время, дистанция и скорость сближения) отображаются в оценку степени опасности по шкале RYG.

4. Комплексная оценка безопасности навигационной ситуации строится из частных оценок опасности судов-целей и навигационных опасностей и ограничений как минимум оценок по шкале RYG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.
4. Викулин П. В. Алгоритм безопасного движения судна по контрольным точкам маршрут / П. В. Викулин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 109–113.
5. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
6. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение: сб. науч. трудов ОНМА. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
7. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.
8. Емельянов М. Д. Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт РФ. — 2009. — №. 3–4 (22–23). — С. 40–45.

9. Дорожко В. М. Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов / В. М. Дорожко, А. Н. Лебедева // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 43–49.

10. Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.

THE PROBLEM OF ESTIMATION OF NAVIGATION SITUATION IN THE SEA

The article discusses the problem of maritime safety. To solve it developed an automated vessels collision avoidance system. An important component of this system is the module of estimation of the navigation situation. Estimation of the navigation situation is based on the forecast trajectories own ship and other vessels. This takes into account the risk of collisions with vessels sailing in the area, as well as the availability of navigation dangerous and restrictions. The Safety scale was developed. A system of rules for the risk assessment of each of the target vessels was proposed. To estimate the risk of collision with a target vessel use parameters of approach: time, distance and the speed of closest approach. The article presents a production system by which risk assessment is carried out of each of the vessels on the proposed scale. Based on the risk assessment of each of the vessels constructed a comprehensive estimation of safety to navigation.

Keywords: collision avoidance system, the estimation of navigation situation, risk of collision.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72). 5-e izd.* M.: Morkniga, 2011.
2. Vasilev, S. N., A. K. Zherlov, E. A. Fedosov, and et al. *Intellektualnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami.* M.: Fizmatlit. 2000.
3. Dmitriev, S. P., N. V. Kolesov, A. V. Osipov, and G. N. Romanycheva. "System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256-263.
4. Vikulin, P. V. "Algorithm of safe ship movement along control points of the route." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 109-113.
5. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. *Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami.* Odessa: Feniks, 2010.
6. Vagushhenko, L. L., and A. L. Vagushhenko. "Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov." *Sudovozhdenie: Sb. nauch. trudov ONMA* 15 (2008): 35-43.
7. Cymbal, N. N., and R. Ju. Buzhbeckij. "Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124-129.
8. Emeljanov, M. D. "Primenenie uslovnyh riskov dlja ocenki bezopasnosti morskikh sudov." *Transport RF* 3-4(22-23) (2009): 40-45.
9. Dorozhko, V. M., and A. N. Lebedeva. "Expert judgments about basic situational models of collective movements of ships." *Control Sciences* 4 (2006): 43-49.
10. Smolentsev, S. V., B. V. Afanasiev, A. E. Filyakov, and D. V. Kunits. "Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 11-14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Smolentsev Sergey Victorovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 октября 2015.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОСВЯЩЁННЫХ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СУДОВОЖДЕНИИ

Приводится обзор исследований российских и зарубежных учёных, посвящённый использованию нейронных сетей, а также гибридных нейро-нечётких систем при моделировании динамики судна, для определения его маневренных элементов, обработки навигационной информации, построения систем управления его движением. В связи с тем, что важной задачей судовождения является получение координат места судна в режиме счисления, обзор проводится именно с позиции возможности использования нейросетевых алгоритмов для решения данной задачи. Общей чертой рассмотренных в статье публикаций является то, что нейросетевые системы не учитывают волнение в качестве существенного для счисления внешнего фактора. Более того, в рассматриваемых исследованиях отсутствуют методики полноценного тестирования нейросетевых систем в различных навигационных ситуациях. Отмечается, что путь к созданию работоспособной системы нейросетевого счисления должен лежать в области разработки методик, уменьшающих влияние указанных недостатков.

Ключевые слова: нейронная сеть, нейро-нечёткая система, судовождение, счисление пути судна, адаптивное управление

В АЖНОЙ задачей судовождения является получение координат места судна в автономном режиме — *ведение счисления*. Роль счисления особенно велика, когда по тем или иным причинам в течение длительного периода времени определение координат судна по внешним измерениям невозможно. Изменение счислимых координат судна носит, в общем случае, нелинейный характер. Более того, измерение исходных величин, по которым рассчитываются координаты, происходит, как правило, в условиях значительной неопределённости и неполноты данных. Например, параметры волнения могут быть определены лишь на основе визуальной оценки. Отмеченные свойства процесса счисления должны быть обязательно учтены при разработке новых методов определения автономных координат судна. С позиции нелинейности и неопределённости перспективным представляется использование нейронных сетей, нечётких и гибридных нейро-нечётких систем при проектировании систем счисления, направленном на повышение точности определения места судна.

Применение нейросетевых технологий в судовождении, связанное с задачей построения системы счисления, происходит по двум основным направлениям. Первое направление включает исследования, в которых рассматривается использование нейронных сетей и гибридных нейро-нечётких систем в задачах обработки навигационной информации и определения параметров движения судна. Второе направление представляют исследования, в которых изучается возможность построения нейросетевых (нейро-нечётких) систем управления движением судна. Рассмотрим в обзорном порядке наиболее известные работы по каждому из указанных ранее направлений.

Нейронные сети в задачах обработки навигационной информации. В исследовании [1] предлагается подход к решению задачи комплексирования навигационной информации, поступающей от инерциальной и спутниковой системы. Комплексирование выполняется на основе фильтра Калмана. Элементы матриц перехода и измерения, а также матричного коэффициента усиления являются в то же время коэффициентами нейронной сети. Элементы матричного коэффициента подлежат коррекции в соответствии с поступающими измерениями вектора состояния, тем самым обеспечивается адаптивность фильтра. Результаты численного эксперимента позволяют сделать вывод о состоятельности предложенной технологии комплексирования для частного случая движения объекта.

Исследование [2] посвящено применению нейросетевых технологий в решении задачи комплексирования спутниковой и инерциальной систем. Слабосвязанное комплексирование выпол-

няется на основе фильтра Калмана. Для фильтрации шумовых погрешностей процесса и измерений используется сеть с радиальными базисными функциями (*RBF—Radial Basis Functions*), параметры структуры которой настраиваются с использованием метода роя частиц (*PSO—Particle Swarm Optimization*) в режиме реального времени. В результате определяются оценки ковариационных матриц процесса и измерений, которые используются в алгоритме фильтрации. Было выполнено моделирование движения летательного аппарата в течение 30 мин, координаты которого определялись с использованием корректируемой системы в условиях ошибок измерений датчиками навигационной информации. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что точность определения координат объекта с использованием предлагаемого подхода существенно выше по сравнению со стандартной методикой комплексирования, основанной на применении фильтра Калмана.

В статье [3] рассматривается применение нейронной сети *RBF* для прогноза координат объекта в случае выхода из строя инерциального блока корректируемой навигационной системы, когда траектория движения может быть получена только на основе данных спутниковой навигационной системы. Предлагается подход, заключающийся в том, что поступающий на вход нейронной сети вектор координат проходит предварительную обработку при помощи фильтра низких, средних или высоких частот. Рассматривается также стандартный подход, не предполагающий использование указанных фильтров. В том и другом случае нейронная сеть прогнозирует оптимальную траекторию движения объекта по данным спутниковой навигационной системы, характеризующейся шумами измерений. Основным результатом исследования состоит в том, что оба рассматриваемых подхода позволяют прогнозировать траекторию с практически одинаковой точностью, но использование фильтра значительно сокращает время обучения нейронной сети.

В работе [4] предлагается другой вариант использования нейронной сети для прогноза траектории движения наземного объекта в случае потери сигнала от спутниковой навигационной системы. Система состоит из трёх многослойных персептронов, каждый из которых прогнозирует приращения пространственных координат центра тяжести судна. На вход системы поступает сигнал, формирующийся из составляющих вектора скорости, координат на предыдущем шаге, интегралов линейного ускорения и угловой скорости поворота судна. Для выбора оптимальной структуры и алгоритма обучения используется следующий подход. Проводится десятиминутный натурный эксперимент, в котором фиксируются параметры движения, получаемые с использованием спутниковой и бесплатформенной инерциальной навигационных систем. На основе экспериментальных данных формируются две выборки: для обучения и тестирования нейронной сети. Варьированием алгоритма обучения и параметров структуры сети: числа слоёв и количества нейронов в них, находится оптимальная по точности и скорости сходимости процесса обучения архитектура системы. При этом исследуется точность прогноза вертикальной координаты судна. После выбора оптимальной структуры сеть проходит тестирование в другом натурном эксперименте, когда наземное транспортное средство совершает движение в течение 500 с. В течение первых 230 с интегрированная система работает в обычном режиме, используя всю необходимую информацию для прогноза траектории. В этот промежуток времени происходит также и обучение нейронной сети. В оставшиеся 270 с движение происходит при отсутствии сигнала спутниковой системы, а определение координат осуществляется инерциальной системой, а также её комбинацией с нейронной сетью. Использование одной лишь инерциальной системы приводит к накоплению пространственной ошибки определения координат, равной приблизительно 3 км. При использовании комбинированной с нейронной сетью системы величина ошибки составляет приблизительно 200 м.

Задача прогнозирования траектории движения судна может быть решена на основе фокусированной сети прямого распространения с задержкой по времени (*TLFN—Time Lagged Feed Forward Network*), как показано в [5]. Нейронная сеть состоит из двух слоев, первый из которых содержит нейроны с сигмоидальными функциями активации, а второй имеет один нейрон с тождественной функцией активации. Сеть, принимая на вход вектор задержанных значений координаты

судна в географической системе, прогнозирует её значение на шаг вперёд. Обучение сети происходит в режиме реального времени на основе выборки, содержащей определённое количество предшествующих точек траектории. Результаты тестирования сети показали, что в рассмотренных модельных ситуациях она прогнозирует траекторию движения судна с удовлетворительной для навигационных целей точностью. Синтезированная нейронная сеть может использоваться также и в качестве адаптивного фильтра. Проводилось сравнение работы нейросетевого фильтра и фильтра Калмана в условиях, когда координаты судна имеют шумовые погрешности, распределённые по нормальному и равномерному закону распределения. Результаты фильтрации в десятиминутной модельной ситуации свидетельствуют о том, что использование нейросетевого фильтра является более эффективным по сравнению с применением фильтра Калмана с позиции уменьшения максимума модуля невязки на промежутке времени плавания.

Исследование [6] посвящено проблемам оценивания текущего вектора состояния судна и прогнозирования его значения на шаг вперёд. Задача оценивания вектора горизонтальных координат судна выполняется при помощи рекуррентной нейронной сети с двумя скрытыми слоями. Задача прогнозирования решается с использованием рекуррентной сети с тремя скрытыми слоями. Принимая на вход текущее и несколько предыдущих значений координаты судна, сеть прогнозирует её значение на шаг вперёд. Работа нейронных сетей по прогнозированию траектории движения судна сравнивалась с фильтром Калмана. Параметры движения судна получались в ходе решения системы дифференциальных уравнений при плавании в условиях регулярного синусоидального волнения. При решении задачи прогнозирования использовались два фильтра Калмана. Один из них был синтезирован исходя из условия, что динамическая модель процесса движения судна известна, другой был построен при отсутствии подобной информации. Точность прогноза траектории нейронной сетью оказалась на приблизительно таком же уровне, как и фильтром Калмана, построенном с учётом информации о динамике судна. Преимущество нейросетевого метода прогнозирования параметров движения судна по сравнению с калмановским алгоритмом заключается в том, что не требуется использование динамической модели судна и знание статистической информации о погрешностях измерений и процесса.

В статье [7] предлагается использование трёхслойного персептрона для решения задачи сглаживания временных рядов, элементами которых являются координаты места судна. Эталонными для нейронной сети значениями координат являются их оценки, полученные на выходе фильтра Калмана, т. е. сеть используется для уточнения результатов фильтрации. Сравнение работы алгоритма Калмана и нейронной сети выполнялось на основе данных о движении наземного транспортного средства, полученных при помощи аппаратуры ГЛОНАСС, в течение 10 часов. Критерием точности выбрана среднеквадратическая ошибка определения координат транспортного средства. Результаты сравнения позволили авторам сделать вывод о более высокой точности нейросетевого предиктора наблюдаемых параметров движущегося объекта в системе ГЛОНАСС по сравнению с традиционным фильтром Калмана.

Исследование [8] посвящено использованию нейронной сети для прогноза траектории движения судна в режиме реального времени. Входной сигнал сети формируют путевой угол и модуль вектора абсолютной скорости судна. На выходе получают приращения к географическим координатам центра тяжести судна. Фактически, нейронная сеть выполняет функцию алгоритма счисления пути судна. Сеть содержит два слоя, нейроны которых имеют сигмоидальные функции активации. Дискретность прогноза траектории составляет одну минуту. Образцы формируются в ходе тридцатиминутного плавания реального судна по реке Янцзы с изменением курса в условиях влияния ветра и волнения. Тестирование обученной сети выполняется на образцах, полученных в процессе плавания в течение последующих 25 мин. В ходе тестирования сравнивались две траектории, одна из них получена при помощи нейронной сети, а другая с использованием соотношений, справедливых для проекции Меркатора. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть прогнозирует траекторию судна с большей по сравнению с традиционным алгоритмом точностью.

В статье [9] исследуются взаимосвязь и отличия двух подходов, используемых при решении нелинейных задач оценивания. Первый из них — байесовский подход — основан на положениях теории вероятностей, другой заключается в использовании нейросетевых технологий. В исследовании показана взаимосвязь обоих подходов, заключающаяся в том, что при увеличении объёма обучающей выборки критерий, подлежащий минимизации в процессе настройки свободных параметров сети, стремится в данном классе нейронных сетей к среднеквадратичному критерию, используемому при синтезе оптимальных алгоритмов оценивания на основе байесовского подхода. Основное отличие подходов состоит в том, что для реализации байесовского подхода требуется исчерпывающая информация о свойствах оцениваемых параметров и ошибок измерений как случайных процессов, в то время как построение нейросетевых алгоритмов оценивания возможно без использования такой информации в явном виде.

Работа [10] посвящена использованию нейронных сетей для контроля целостности инерциальных навигационных систем в условиях избыточности информации. Для определения сбоя в работе конкретного датчика инерциальной системы используются два многослойных персептрона с задержками во времени входных сигналов. Один из них обучается на образцах, которые соответствуют работе системы с неисправностями в канале датчика, а другой — на образцах, соответствующих работе системы в исправном состоянии. В зависимости от того, какая сеть лучше прогнозирует в плане точности измерения на текущем временном шаге, делается вывод о наличии неисправности.

В статье [11] предлагается следующий подход к созданию модели движения судна на основе нейронной сети: составляется линейное уравнение состояния судна, содержащее матрицу перехода и матрицу управляющих воздействий. При помощи рекуррентной сети Хопфилда определяются коэффициенты данных матриц. Обучается сеть в режиме реального времени по мере поступления образцов, получаемых по результатам измерений. Вектор состояния включает координаты судна, угловую и линейную скорость, его курс, угол дрейфа на циркуляции. На основе уравнений движения судна были сформированы модельные ситуации для стандартных манёвров «циркуляция» (с углами перекладки руля 20° и 35°) и «зигзаг», в ходе которых непрерывно обучаемая нейронная сеть прогнозировала элементы матриц состояния и управления таким образом, что относительная ошибка параметров движения судна не превышала 1 % в рассмотренных модельных ситуациях.

Рассмотрим теперь исследования, в которых приводится построение моделей движения судна на основе нейронных сетей. Особенностью данных исследований является то, что настраиваемые параметры синтезированных систем остаются инвариантными к входным сигналам, поступающими на их вход.

В работе [12] предлагается построение модели движения судна на основе двухслойной нейронной сети NARX (Nonlinear Auto Regression with External inputs). Сеть принимает на вход скорость судна и угол перекладки руля, а прогнозирует рыскание и скорость дрейфа, которые подаются на вход сети по линии обратной связи. Настройка свободных параметров нейронной сети происходит на образцах, полученных в результате применения модели движения судна в горизонтальной плоскости на основе дифференциальных уравнений. Параметрами имитационной модели служат характеристики судна среднего тоннажа. Рассматриваются два типичных манёвра — «циркуляция» и «зигзаг». В каждом случае формируются выборки образцов, получаемые при различных сочетаниях скорости судна и угла перекладки руля. Множество образцов подразделяется на три подмножества, которые формируют выборки для обучения, проверки обобщающих свойств сети и её тестирования. В ходе тестирования нейронная сеть прогнозирует скорость дрейфа и угол рыскания с достаточной для навигационных целей точностью — наибольшая относительная погрешность в координатах в тестовых ситуациях не превосходит 5,7 % (на циркуляции). Особенность данного подхода к моделированию движения судна заключается в том, что нейронная сеть обучается для каждого типа манёвра отдельно. Иными словами, существует две сети, одна из которых обучена для манёвра «циркуляция», а другая — для манёвра «зигзаг».

В диссертации [13], подготовленной *Adel Ebada*, в Институте судовых технологий и транспортных систем Университета *Duisburg-Essen* (Германия) предлагается построение модели движения судна на основе нейронной сети. Используется многослойная нейронная сеть прямого распространения, прогнозирующая параметры движения судна на циркуляции (координаты, скорость, угол дрейфа, курс и др.) и имеющая своим входным сигналом величины, зависящие от управляющих воздействий со стороны движительно-рулевого комплекса судна (числа оборотов винта и угла перекаладки руля). Предлагается два подхода — прямой и силовой. При прямом подходе на вход сети подаются непосредственно угол перекаладки руля и число оборотов винта. В случае силового подхода, входной сигнал содержит силы, воздействующие на корпус судна со стороны винта и руля, которые вычисляются с использованием известных из теории судна зависимостей. Построение нейросетевой системы счисления и её дальнейшее тестирование было выполнено для четырёх крупнотоннажных судов различных серий, оборудованных стандартным рулевым устройством и имеющих один винт правого вращения. Обучение нейросети выполняется на образцах, полученных при помощи двух навигационных тренажёров: «*American Analytics ShipSimulators*» и «*Norcontrol Simulators*». Предполагается, что движение судна происходит на тихой глубокой воде в открытом море при отсутствии ветра. В рассмотренных модельных ситуациях, которые характеризовались различными значениями углов перекаладки руля при данной начальной скорости, сеть прогнозирует параметры движения судна на циркуляции с высокой навигационной точностью. Сеть, на вход которой подаются силовые воздействия, как показали результаты тестирования, имеет меньшую точность по сравнению с сетью, построенной из соображений прямого подхода, что, по мнению автора указанного исследования, объясняется тем, что используемые зависимости для расчёта сил не учитывают взаимозависимости в системе «руль — винт — корпус», которые в действительности существуют.

Статья [14] посвящена построению нейронной сети, которая прогнозирует элементы циркуляции судна в зависимости от его физических характеристик, параметров движительно-рулевого корпуса, а также элементов движения в момент начала циркуляции. Используется двухслойная нейронная сеть прямого распространения. На вход сети подаются следующие величины: длина судна между перпендикулярами, ширина судна, осадка, коэффициент общей полноты, абсцисса центра тяжести судна, диаметр винта, скорость в момент начала циркуляции, относительное удлинение руля и площадь его боковой проекции. Выходными сигналами сети служат: выбег, выдвиг, тактический диаметр циркуляции, время выхода на противоположный курс, диаметр установившейся циркуляции, потеря скорости и угол дрейфа на установившейся циркуляции. В основе имитационной модели движения судна в горизонтальной плоскости лежит система дифференциальных уравнений, правые части которых содержат силы и моменты, зависящие от характеристик конкретного судна и параметров его движительно-рулевого комплекса. Варьированием входных величин был получен набор образцов из 260 образцов, 230 из которых использовались для обучения нейронной сети, а 30 — для проверки её обобщающих свойств. Результаты тестирования показали, что нейронная сеть прогнозирует элементы циркуляции с относительной погрешностью, не превышающей 7 % в рассмотренных ситуациях. Похожая нейросетевая система с идентичным входным сигналом была синтезирована и для определения элементов другого стандартного манёвра — «зигзаг». Элементы данного манёвра: время изменения курса на 10° , углы первого и второго перерегулирования и др., прогнозировались нейронной сетью с приемлемой степенью точности.

Похожий подход к использованию нейронных сетей для прогнозирования элементов циркуляции судна изложен в работе [15], в которой предлагается использовать двухслойную нейронную сеть прямого распространения, прогнозирующую диаметр установившейся циркуляции судна в зависимости от физических характеристик его корпуса и рулевого устройства, кинематических характеристик движения, величины аэродинамических сил. Входными сигналами нейронной сети являются массовое водоизмещение, длина, ширина, осадка, угол дифферента, коэффициент общей полноты, абсцисса места установки руля, число рулей, абсцисса центра тяжести, скорость,

метацентрическая высота, индикатор стороны поворота судна, сила ветра, действующая на надводную часть корпуса судна. Сеть обучается на образцах, полученных в результате проведения серии натурных наблюдений для гидрографического судна и военного корабля. Тестирование нейронной сети выполнялось также с использованием экспериментальных данных, полученных при маневрировании указанных судов. В проведенных натурных испытаниях для каждого судна варьировались скорость, условия его загрузки и угол перекладки руля. Диаметр установившейся циркуляции прогнозировался нейронной сетью, а также с использованием модели движения судна в горизонтальной плоскости на основе дифференциальных уравнений. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть справляется с задачей определения диаметра установившейся циркуляции не хуже, а в отдельных случаях даже лучше модели, основанной на положениях классической теории.

В статье [16] предлагается построение нейро-нечёткой системы для идентификации модели судна. Рассматривается гибридная система GEBF — FNN (*Generalized Ellipsoidal Basis Function Based Fuzzy Neural Network*), на вход которой поступает вектор, компонентами которого служат координаты и проекции скорости судна, угол рыскания и его производная, угол перекладки руля для текущего момента времени. Выходным сигналом системы является вектор этих же параметров для последующего момента времени, исключая угол перекладки руля. Система обучается в последовательном режиме с использованием имитационной модели танкера объёмным водоизмещением 220000 м³. При её использовании для получения необходимого количества образцов угол перекладки руля меняется в течение времени по закону синуса. Затем выполняется проверка нейро-нечёткой системы с использованием манёвра «зигзаг», результаты которой позволяют сделать вывод о том, что она прогнозирует параметры движения судна с высокой точностью. Так относительная погрешность координат не превосходит 1% при выполнении судном указанного манёвра.

Использованию гибридных нейро-нечётких систем для прогноза скорости судна в условиях внешних возмущений посвящена более ранняя работа [17]. В ней предложена система ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), которая прогнозирует изменение скорости судна при наличии ветра, течения и волнения. Система обучается на образцах, полученных с использованием навигационного тренажёра Navi-Trainer NTPRO 4000 для модели крупнотоннажного навалочного судна. Количество модельных ситуаций было взято в одном случае равным 126, а в другом — 252. Кроме того, использовались различные функции принадлежности при создании и обучении системы. Основным результатом исследования состоит в том, что синтезированная гибридная система позволяет прогнозировать среднюю скорость судна в условиях внешних факторов с достаточно высокой точностью.

Применение нейросетевых технологий для построения системы, прогнозирующей относительную скорость судна в условиях влияния ветра и волнения, рассматривается в статье [18]. Система состоит из двух нейронных сетей. Первая сеть (сеть № 1) принимает на вход величины, характеризующие действующие на судно внешние факторы, а также кинематические параметры его движения. Выходным сигналом является скорость дрейфа судна. Сеть имеет два слоя, первый из которых содержит 15 нейронов с сигмоидальными функциями активации, а второй — один нейрон с тождественной функцией активации. Сеть реализует модель NARX с 15 задержками в линиях входного и выходного сигналов. Вторая сеть (сеть № 2), являясь статической, принимает на вход вектор, компоненты которого характеризуют кинематику судна, а прогнозирует составляющие вектора его относительной скорости в локальной географической системе координат. Данная сеть имеет два слоя, первый из которых содержит 20 нейронов с сигмоидальными функциями активации, а второй — два нейрона с тождественными.

Обучение сети № 1 выполняется на основе образцов для сухогрузного судна, полученных с использованием имитационной модели его движения в условиях влияния ветра и волнения. Формирование образцов для настройки сети № 2 производится на основе случайной выборки дискретных значений её входного сигнала с последующим вычислением выхода по известным кинематическим соотношениям. После обучения синтезированная система, состоящая из двух ней-

ронных сетей, проходит проверку работоспособности с использованием имитационной модели. Было рассмотрено 2000 модельных ситуаций, представляющих собой плавание судна в течение четырёх часов в условиях влияния ветра и волнения. Система нейронных сетей позволяет в указанных ситуациях прогнозировать траекторию движения судна таким образом, что наибольшее значение максимума модуля невязки за время плавания составляет 138 м.

В диссертационной работе [19] рассматриваются вопросы использования динамических нейронных сетей для прогнозирования курса судна. Формирование набора образцов осуществляется на основе дифференциального уравнения для нескольких типов судов. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейронная сеть прогнозирует курс судна в различных условиях плавания (ветра и волнения) с достаточной для целей управления точностью.

В работе [20] предлагается двухслойная нейронная сеть прямого распространения, которая выполняет задачу параметрической идентификации модели движения судна в горизонтальной плоскости. В качестве параметров, подлежащих идентификации, выступают коэффициенты демпфирования и гидродинамический коэффициент. На вход сети подаются угол перекладки руля и другие величины, характеризующие движение судна. Образцы формируются на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования. В ходе тестирования нейронной сети сравниваются две траектории. Первая получена с использованием «истинных» коэффициентов, вторая — с использованием коэффициентов, идентифицированных нейронной сетью. При движении судна на циркуляции (с углами перекладки руля 15° и 35°) расхождение траекторий составило несколько метров за период циркуляции.

В диссертационном исследовании [21] предлагается построение интеллектуальной системы стабилизации судна на заданном курсе. Одной из её подсистем является блок, реализующий нейросетевую модель объекта регулирования. При использовании данной модели решаются вопросы выбора архитектуры сети, её алгоритма обучения, а также числа эпох, достаточного для обеспечения заданной точности прогноза курса. В работе было проведено имитационное моделирование движения судов шести типов в различных гидрометеорологических условиях плавания, характеризующихся высотой волны и скоростью истинного ветра. На образцах, полученных в ходе данного моделирования, было проведено обучение сетей различных типов различными алгоритмами обучения. Так, рассматривались сети прямого распространения с алгоритмами обучения Левенберга — Марквардта, Моллера, рекуррентные сети Элмана с такими же методами настройки свободных параметров. Мерой точности обучения был выбран средний квадрат ошибки курса. Основным результатом части исследования, посвящённой выбору нейронных сетей для системы управления курсом, заключается в том, что в рассмотренных модельных ситуациях наиболее адекватно динамику судна воспроизводят нейронные сети прямого распространения с алгоритмом обучения Левенберга — Марквардта.

Одним из последних исследований в области применения нейросетевых технологий при моделировании динамики судна является работа [22]. В ней предлагается использовать две статические двухслойные нейронные сети, одна из которых прогнозирует ускорение дрейфа судна, а другая — угловое ускорение рыскания. На вход указанных сетей поступает вектор, компоненты которого содержат угол перекладки руля, угловую скорость поворота и скорость дрейфа. Для формирования необходимого для обучения нейросети количества образцов используется линейная модель, представляющая собой систему из двух линейных уравнений с постоянными коэффициентами. Работа линейной модели проходит в условиях волнения, которое нарушает адекватность пар вход— выход. Обе нейронные сети были обучены на множестве из 200000 образцов, после чего они были линеаризованы относительно нулевого положения вектора состояния, и восстановлены коэффициенты линейной модели. Относительная погрешность определения указанных коэффициентов с использованием нейронных сетей не превосходит 9 %.

Интересное исследование выполнено в работе [23], где предлагается использовать двухслойную нейронную сеть с алгоритмом GMDH (*Group Method of Data Handling*) и гибридную систему ANFIS для прогнозирования величины просадки судна на мелководе. Входной сигнал систем

имеет своими компонентами коэффициент общей полноты судна, безразмерный запас воды под килем, а также число Фруда. Образцы, с использованием которых выполняется настройка параметров систем, получены на основе экспериментов с моделями двух судов в опытовом бассейне, корпуса которых относятся к серии 60. Суды имеют коэффициенты полноты 0,70 и 0,75. Множество учебных данных состоит из восьмидесяти двух пар вход—выход, первые шестьдесят из которых используются для настройки параметров систем, а оставшиеся двадцать две — для проверки их обобщающих свойств по мере обучения и тестирования. Результаты проверки работоспособности нейронной сети, нейро-нечёткой системы, а также модели линейной регрессии показали, что наилучшую точность прогноза просадки среди указанных систем имеет ANFIS.

Нейронные сети в задачах управления движением судна. В диссертации [24] предлагается использовать нейросетевой регулятор, стабилизирующий судно на заданном курсе с использованием нейросетевой модели объекта управления. Работа синтезированной системы управления сравнивается с работой регулятора на основе нечёткой логики, ПИД-регулятора с настройкой нейронной сетью, а также классического ПИД-контроллера. Моделирование движения контейнеровоза, имеющего объёмное водоизмещение 18541 м^3 , основано на использовании модели Номото 1-го порядка. Для каждого типа регулятора рассматривались четыре различных режима работы, среди которых изменение задающего воздействия, воздействие простого и сложного волновых возмущений, влияние резкого возмущения (порыв ветра или удар большой волны). Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что нейросетевой контроллер решает задачу управления курсом судна лучше по сравнению с другими алгоритмами, что относится как к характеристикам переходного процесса, так и критериям точности в установившемся режиме. Более того, нейросетевая система обеспечивает стабилизацию судна на курсе с наименьшей нагрузкой на рулевую машину.

Интересный вариант системы автоматической стабилизации движения судна на основе нейронных сетей предлагается в статье [25]. Регулируемой величиной выступает вектор, содержащий в качестве своих компонентов углы рыскания и бортовой качки судна. Как и в предыдущем исследовании, движение судна моделируется при помощи многослойной нейронной сети, настройка параметров которой выполняется в режиме реального времени в соответствии с текущей динамикой судна. Однако при этом выход данной сети используется для расчёта рассогласования, поступающего на вход другого «воображаемого» контроллера – нейронной сети, коэффициенты которой настраиваются таким образом, чтобы минимизировать указанное рассогласование, и их значения используются уже в структуре реального нейросетевого регулятора. Таким образом, настройка параметров регулятора происходит с использованием модели системы автоматического регулирования, без непосредственного использования данных о векторе состояния судна. Было проведено моделирование движения судна массовым водоизмещением 442 т, в ходе которого выполнялась стабилизация углов бортовой качки и рыскания на интервале 200 с при помощи классического алгоритма LQG (*Linear Quadratic Gauss Algorithm*) и нейросетевой системы регулирования. Использование последней позволило получить уменьшение среднеквадратической ошибки регулирования от $0,92^\circ$ до $1,42^\circ$ по углу качки, и $0,74^\circ$ до $1,68^\circ$ для угла рыскания.

В статье [26] предлагается построение регулятора курса судна на основе двухслойной нейронной сети прямого распространения. Входными сигналами её являются отклонение судна от заданного курса, угловая скорость поворота и текущее положение пера руля. Выходным сигналом служит угол перекаладки руля. Для проверки работоспособности нейросетевого контроллера было выполнено имитационное моделирование движения контейнеровоза серии S-175 в различных режимах управления, характеризующихся определённой скоростью хода, начальной величиной рассогласования и ветровым воздействием. Стабилизация судна на курсе выполнялась с использованием нейросетевого регулятора и ПД-регулятора. Результаты проведённого исследования позволяют сделать вывод о том, что использование нейросетевого регулятора позволяет повысить точность стабилизации судна на заданном курсе в среднем более чем в два раза по сравнению с применением ПД-алгоритма, при немного более интенсивной работе рулевой машины.

В работе [27] описывается построение системы стабилизации судна на заданном курсе на основе регулятора NARMA-L2 с выделенной составляющей управления (*Nonlinear Auto Regressive Moving Average*). В структуре системы управления имеется многослойная нейронная сеть, выполняющая функцию идентификации судна как объекта управления и обучающаяся в режиме реального времени. Проверка работоспособности системы регулирования выполнялась путём моделирования движения транспортного судна дедвейтом 11560 т. В течение 400 с плавания заданное значение курса изменялось по определённой программе таким образом, что на указанном интервале времени были участки как постоянного заданного значения курса, так и меняющегося с определённой угловой скоростью в пределах 15 – 20 град / мин в сторону обоих бортов. Результаты сравнения заданного значения курса и фактического в каждый момент времени позволяют сделать вывод о том, что синтезированный NARMA-L2 контроллер выполняет задачу стабилизации судна на курсе с высокой для навигационных целей точностью.

Исследование [28] посвящено использованию двухслойной нейронной сети прямого пространства в качестве регулятора курса судна. Входным сигналом сети является вектор, компонентами которого служат курс судна и его угловая скорость поворота, а также отклонения указанных величин от заданных значений. Прогнозируемым сетью сигналом является угол перекадки руля. Параметрами имитационной модели выбраны характеристики танкера, имеющего массовое водоизмещение 220000 м³. Настройка коэффициентов сети выполняется *a priori* на основе модельных ситуаций, в которых судно на тихой глубокой воде при отсутствии ветра удерживается при помощи регулятора, реализующего следящий режим управления SMC (*Sliding Mode Control*) и выступающего в роли «учителя» для нейронной сети. Работоспособность нейронной сети проверялась в идеальных условиях плавания, на мелководье, а также при воздействии волнения. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что нейросетевой регулятор справляется с задачей удержания судна на заданном курсе не только в идеальных условиях плавания, при которых выполнялась настройка его параметров, но и в других условиях, характеризующихся изменением параметров объекта регулирования и силовых внешних воздействий. Иными словами, нейросетевой регулятор обладает свойством робастности к вариациям физических характеристик судна и возмущающих внешних сил, т. е. обладает качествами, присущими SMC-контроллеру.

Похожий подход к построению системы автоматического удержания судна на заданном курсе предложен в работе [29]. Двухслойная нейронная сеть выступает в качестве регулятора, прогнозируя угол перекадки руля в зависимости от текущего значения курса, угловой скорости поворота и скорости дрейфа. Обучение нейронной сети происходит с использованием образцов, полученных в ходе имитационного моделирования движения грузового судна водоизмещением 21200 м³, на основе уравнения Номото 2-го порядка. В ходе тестирования нейросетевого регулятора при плавании судна в течение 1000 с наибольшее значение модуля ошибки управления по курсу составило 2,5°, а по угловой скорости поворота — приблизительно 0,05 град /с.

Известен ряд исследований [30] – [32] и др., в которых предлагается использовать нейронные сети в комбинации с алгоритмами, основанными на теории нечётких множеств и нечёткой логики. Как правило, нейронные сети выполняют функцию алгоритма оптимизации в системах нечёткого вывода. В работе [33] предложено построение нейро-нечёткого регулятора для решения задачи стабилизации судна на заданной траектории. Указанная задача решается на основе системы ANFIS, имеющей два входных сигнала: ошибку регулирования курса и её первую производную по времени и один выходной сигнал — угол перекадки руля. Обучение системы выполняется с использованием образцов, получаемых в результате имитационного моделирования движения судна длиной 150 м, шириной 22 м на тихой воде при отсутствии ветра. В течение 1000 с плавания судно совершает манёвр — зигзаг $\pm 40^\circ$ при помощи нечёткого ПД-контроллера. В результате указанного манёвра формируется множество из 10000 образцов. Результаты тестирования синтезированного регулирующего устройства в стандартных ситуациях, включающих изменение курса на значительный угол, задачи проводки судна по заданному маршруту, на тихой воде и в условиях

волнения, показали его работоспособность и робастность по отношению к внешним возмущающим факторам.

Закключение. В рассмотренных исследованиях нейронные сети нашли самое разнообразное применение при решении навигационных задач. В одних случаях коэффициенты нейронной сети зависят от физических характеристик конкретного судна, его движительно-рулевого комплекса, оставаясь постоянными при любых значениях входных сигналов, в других — свободные параметры сети настраиваются в соответствии с текущей динамикой судна, характером изменения траектории его движения, не завися в явном виде от характеристик его корпуса, движителя и рулевого устройства. Нейронная сеть может также выступать в роли регулирующего устройства, стабилизирующего судно на заданном курсе или траектории. При этом коэффициенты сети могут настраиваться как в режиме реального времени на основе величины ошибки регулирования, так и определяться *a priori* на основе эталонных ситуаций, сформированных в процессе управления судном при помощи того или иного регулятора. Результаты проверки работоспособности нейросетевых регулирующих устройств позволяют судить об их эффективности и робастности к изменениям условий движения судна. Использование нейронных сетей также возможно для построения информационных систем, позволяющих прогнозировать параметры движения конкретного судна в режиме реального времени или элементы его циркуляции в статическом режиме. Находят применение нейронные сети и при решении задач комплексирования в интегрированных навигационных комплексах.

Конечно, указанные навигационные задачи могут быть решены и на основе известных классических алгоритмов, уже зарекомендовавших себя в качестве надежных, отработанных методов. Конечной целью применения нейросетевых и нечётких технологий в задачах судовождения является повышение эффективности их решения: увеличение точности счисления, уменьшение ошибок определения параметров движения судна, повышение качества управления и т.д. Тем не менее, обзор указанных исследований показывает наличие лишь в некоторых из них результатов сравнения синтезированных систем с классическими алгоритмами. Однако даже в тех исследованиях, где подобное сравнение имеется, возникают вопросы: *«Действительно ли тот стандартный известный алгоритм, с которым выполняется сравнение, имеет оптимальные параметры, или, быть может, имеется на его основе лучшее решение?»*, *«Какой классический алгоритм использовать для сравнения, если существует выбор из нескольких вариантов?»*.

Следует отметить, что распределение исследований на две основные группы в значительной степени условно. Так, например, модель судна на основе нейронной сети может использоваться как при решении задачи оптимального оценивания вектора состояния судна, так и в составе системы стабилизации параметров его движения. Кроме того, модель судна как объекта регулирования может представлять собой нейронную сеть с постоянными коэффициентами, оптимальные значения которых определяются на этапе идентификации в процессе обучения сети. Несмотря на указанную условность, особый интерес для построения модели счисления пути судна с использованием нейросетевых технологий представляют исследования, в которых нейронная сеть выступает в качестве системы, позволяющей прогнозировать параметры движения судна в конкретных условиях плавания. Обзор таких исследований, рассмотренных ранее, позволяет выявить следующие общие присущие им черты. Во-первых, нейросетевые или гибридные системы, предложенные в рассмотренных работах, не учитывают волнение, и, как правило, ветер в числе факторов, оказывающих существенное влияние на движение судна. Во-вторых, отсутствует полноценная методика тестирования указанных систем в различных условиях плавания судна. Как правило, проверка их работоспособности ограничивается рассмотрением стандартных манёвров наподобие «циркуляции» или «зигзаг». В-третьих, большинство работ не содержат методики выбора оптимальной структуры нейронной сети и алгоритм её обучения применительно к задаче прогноза параметров движения судна. Наконец, в рассмотренных исследованиях не уделяется должного внимания вопросам проведения натурного эксперимента как последнего этапа тестирования синтезируемых систем.

Таким образом, на основе выполненного в настоящей статье обзора исследований в области использования нейросетевых (нейро-нечётких) технологий для решения задач навигации и управления движением судна можно определить круг проблем, решение которых позволит подойти к построению полноценной системы счисления пути судна, её программной и аппаратной реализации в судовых навигационных комплексах. Проблема учёта внешних факторов может быть решена путём совершенствования структуры системы, разработки специальной технологии проведения натурных наблюдений, в ходе которых формируются учебные данные. При проведении натурных экспериментов следует учитывать ограниченность количества эталонных ситуаций движения судна и вариантов воздействия на него внешних сил со стороны ветра и волнения. Проблема тестирования синтезированной системы решается посредством разработки технологии проверки её работоспособности, позволяющей сделать вывод о точности прогнозируемых параметров движения судна с заданным уровнем вероятности. Ввиду невозможности рассмотрения всех навигационных ситуаций, задача тестирования нейронной сети может быть решена лишь в ограниченном их количестве, для чего перспективной выступает идея классификации вектора входного сигнала.

Актуальной является и проблема адаптации нейросетевой системы счисления по отношению к физическим характеристикам корпуса конкретного судна, особенностям его движительно-рулевого комплекса, а также условиям плавания, характеризующимся изменением плотности воды и воздуха, влиянием мелководья и другими подобными эффектами. Система счисления должна предусматривать также определение координат места судна с оценкой их точности, поэтому существует проблема разработки методики определения оценок погрешностей, прогнозируемых системой координат. На начальном этапе решение указанных ранее проблем возможно лишь с использованием имитационного моделирования движения судна, поэтому возникает проблема выбора оптимальной имитационной модели, обладающей, с одной стороны, высоким уровнем адекватности, а с другой стороны, не требующей, для своей реализации слишком больших вычислительных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Числов К. А. Нейроподобный алгоритм коррекции безгироскопной инерциально-спутниковой гравиметрической системы / К. А. Числов // Информатика и системы управления. — 2013. — № 4 (38). — С. 093–099.
2. Jwo D. J. Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS / INS navigation system design / D. J. Jwo, J. J. Chen // Proceedings of 9th IFAC Workshop «Adaptation and learning in control and signal processing» (ALCOSP'07). — 2007. — 7 p.
3. Nguyen-H. M. Improving GPS / INS Integration through Neural Networks / M. Nguyen-H., C. Zhou // Journal of Telecommunications. — 2010. — Vol. 2 (2). — Pp. 1–6.
4. Kaygisiz B. H. GPS / INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network / B. H. Kaygisiz, I. Erkmen, A. M. Erkmen // Journal of Navigation. — 2004. — V. 57. — № 2. — Pp. 297–310. doi: 10.1017/S037346330400267X.
5. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
6. Lainiotis D. G. Neural network application to ship position estimation / D. G. Lainiotis, K. N. Plataniotis, Dinesh Menon, C. J. Charalampous // Proceedings of Conference «OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean». — 1993. — Vol. 1. — Pp. 1384–1389.
7. Болодурина И. П. Применение и адаптация нейросетевых технологий в задаче идентификации динамических объектов / И. П. Болодурина, В. Н. Решетников, М. Г. Таспаева // Программные продукты, системы и алгоритмы. — 2012. — № 1. — С. 1–5.
8. Xu T. A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm / T. Xu, X. Liu, X. Yang // Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS). — 2012. — Vol. 4. — № 11. — Pp. 271–277. doi: 10.4156/AISS.vol4.issue11.33

9. Степанов О. А. Нейросетевые алгоритмы в задаче нелинейного оценивания. Взаимосвязь с байесовским подходом / О. А. Степанов // Материалы докладов XI конференции молодых учёных «Навигация и управление движением». — 2009. — С. 39–65.
10. Деева А. С. Методы контроля и диагностики информационных нарушений инерциальных навигационных систем / А. С. Деева, А. Г. Щипицин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2010. — № 2 (178). — С. 21–25.
11. Zak B. Modelling of ship's motion using artificial neural networks / B. Zak, J. Malecki, Z. Kitowski // Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press. — 2001. — Pp. 298–303.
12. Moreira L. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks / L. Moreira, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. — 2003. — Vol. 30. — № 13. — Pp. 1669–1697. doi:10.1016/S0029-8018(02)00147-6
13. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems / A. Ebada, Germany. — 2007. — 156 p.
14. Abramowski T. Application of artificial neural networks to assessment of ship manoeuvrability qualities / T. Abramowski // Polish Maritime Research. — 2008. — Vol. 15. — № 2. — Pp. 15–21. doi: 10.2478/v10012-007-0059-0
15. Martins P. T. Estimating Maneuvering and Seakeeping Characteristics with Neural Networks / P. T. Martins, V. Lobo // OCEANS 2007-Europe. — IEEE, 2007. — Pp. 1–5.
16. Ning W. A Novel Vessel Maneuvering Model via GEBF Based Fuzzy Neural Networks / W. Ning, W. Dan, L. Tieshan // Control Conference (CCC), 2012. 31st Chinese. — IEEE, 2012. — Pp. 7026–7031.
17. Valcic M. Anfis Based Model for Ship Speed Prediction / M. Valcic, R. Antonic, V. Tomas // Brodo Gradnja. — 2011. — Vol. 62. — № 4. — Pp. 373–382.
18. Дерябин В. В. Применение нейронной сети в модели счисления пути судна / В. В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3. — С. 20–27.
19. Константинова Е. А. Системы управления движением морских судов на основе рекуррентных нейросетевых моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Е. А. Константинова. — Владивосток, 2012. — 21 с.
20. Waclawek P. A neural network to identify ship hydrodynamics coefficients / P. Waclawek // Marine Simulation and Ship Manoeuvrability: Proceedings of the international conference, MARSIM '96, Copenhagen, Denmark, 9–13 September 1996, Rotterdam. — 1996. — Pp. 509–513.
21. Седова Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления судном по курсу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Н. А. Седова. — Владивосток, 2009. — 22 с.
22. Ведякова А. О. Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей / А. О. Ведякова // International Journal of Open Information Technologies. — 2014. — Vol. 2. — № 3. — Pp. 18–22.
23. Salmalian K. ANFIS and Neural Network for Modeling and Prediction of Ship Squat in Shallow Waters / K. Salmalian, M. Soleimani // International journal of mathematical models and methods in applied sciences. — 2011. — Vol. 5. — № 4. — Pp. 848–856.
24. Виткалов Я. Л. Исследование проблем синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Я. Л. Виткалов. — Владивосток, 2006. — 25 с.
25. Yang X. J. Self-Organizing Neural-Net Control of Ship's Horizontal Motion / X. J. Yang, X. R. Zhao // Journal of Physics: Conference Series 48. — 2006. — Pp. 1284–1288.
26. Пипченко А. Д. Разработка робастного регулятора курса судна на базе теории искусственных нейронных сетей / А. Д. Пипченко // Проблемы техники. — 2013. — № 1. — С. 137–142.
27. Подпорин С. А. Использование нейро-нечётких контроллеров в системах управления движением морских судов / С. А. Подпорин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. — 2012. — Вип. 4 (33). — С. 181–187.
28. Pathan D. M. Neural Network Steering Controller For A Ship / D. M. Pathan, T. Hussain, J. Daudpoto, I. A. Memon // Sindh. Univ. Jour. (Sci. Ser.). — 2012. — Vol. 44. — № 3. — Pp. 399–404.
29. Khizer A. N. Design of Heading Controller for Cargo Ship using Feed Forward Artificial Neural Network / A. N. Khizer, D. Yaping, M. A. Unar // International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT). — 2013. — Vol. 5. — № 9. — Pp. 556–566. doi:10.4156/ijact.vol5.issue9.66

30. Minghui W. Adaptive Neural-Based Fuzzy Inference System Approach Applied to Steering Control /W. Minghui, Y. Yongquan, L. Wei // *Advances in Neural Networks*. — ISSN 2009. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — Pp. 1189–1196.
31. Yongqiang Z. Ship intelligent autopilot in narrow water / Z. Yongqiang, G. E. Hearn // *Control Conference (CCC)*, 2008. 27th Chinese. — IEEE, 2008. — Pp. 243–248.
32. Zhang X. Anfis Applied to a Ship Autopilot Design / Xian-Ku Zhang, Yi-Cheng Jin, Ge Guo // *Machine Learning and Cybernetics*, 2006. International Conference on. — IEEE, 2006. — Pp. 2233–2236.
33. Lee S. Ship Steering Autopilot Based on ANFIS Framework and Conditional Tuning Scheme / Sin-Der Lee, Ching-Yaw Tzeng, Wen-Wei Huang // *Marine Engineering Frontiers (MEF)*. — 2013. — Vol. 1. — № 3. — Pp. 53–62.

REVIEW OF RESEARCHES OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN NAVIGATION

In the article the review of national and international scientific investigations dedicated to neural network and hybrid neuro-fuzzy systems implementation to vessel's dynamic modeling, determination of its maneuvering elements, navigational information processing, and construction of vessel motion control systems is performed. As dead reckoning is important task of navigation, the review was made from the point of view of neural networks implementation possibility for solving this task. General feature of reviewed publications is that neural network systems don't take into account waves' influence as important for dead reckoning external factor. Furthermore methods of complete testing of constructed neural network systems in various navigation situations are not presented in the reviewed researches. It is noted, that way to operational neural network based dead reckoning system creation must be in field of development of methods, decreasing influence of weaknesses mentioned above.

Keywords: neural network, neuro-fuzzy system, navigation, dead reckoning of vessel track, adaptive control.

REFERENCES

1. Chislov, K. A. "Neurosimilar algorithm for correction of the nongyro-inertialsatellite gravimetric system". *Information Science and Control Systems* 4(38) (2013):093–099.
2. Jwo, Dah-Jing, and Jyh-Jeng Chen. "Neural network aided adaptive Kalman filter for GPS/INS navigation system design." *Proceedings of 9th IFAC Workshop "Adaptation and learning in control and signal processing" (ALCOSP'07)*. 2007.
3. Nguyen-H., Mathieu, and Chi Zhou. "Improving GPS/INS Integration through Neural Networks." *Journal of Telecommunications* 2(2) (2010): 1–6.
4. Kaygisiz, Burak H., Ismet Erkmen, and Aydan M. Erkmen. "GPS/INS Enhancement for Land Navigation using Neural Network." *Journal of Navigation* 57.02 (2004): 297–310. DOI: 10.1017/S037346330400267X
5. Sazonov, A.E., and V. V. Deryabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
6. Lainiotis, D. G., K. N. Plataniotis, Dinesh Menon, and C. J. Charalampous. "Neural network application to ship position estimation." *Proceedings of Conference "OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean"* 1 (1993):1384–1389.
7. Bolodurina, I. P, V. N. Reshetnikov, and M. G. Taspaeva. "Primenenie i adaptacia neyroseteviyh tehnologiy v zadache identifikacii dinamicheskikh obectov." *Programmiyeprodukty, sistemiyalgoritmy* 1 (2012): 1–5.
8. Xu, Tingting, Xiaoming Liu, and Xin Yang. "A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm." *Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS)* 4.11 (2012): 271–277. DOI: 10.4156/AISS.vol4.issue11.33
9. Stepanov, O. A. "Neyrosetevyy algoritmy v zadachene lineinogo ocenivania. Svyaz s bayesovskim podhodom." *Materialy dokladov XI konferencii molodyh uchjonyh "Navigacija i upravlenie dvizheniem"*. 2009: 39–65.
10. Deeva, A.S., and A. G. Shchipitsyn. "Methods of monitoring and diagnostic of information faults of inertial navigation systems." *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komputerniye tehnologii, upravlenie, radioelektronika* 2(178) (2010): 21–25.

11. Zak, B., J.Malecki, and Z.Kitowski. "Modelling of ship's motion using artificial neural networks." *Advances in Neural Networks and Applications, World Scientific and Engineering Society Press* (2001): 298–303.
12. Moreira, L., and C. GuedesSoares. "Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks." *Ocean Engineering* 30.13 (2003): 1669-1697. DOI:10.1016/S0029-8018(02)00147-6
13. Ebada, Adel. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation, Institute of Ship Technology und Transport Systems.2007.
14. Abramowski, Tomasz. "Application of artificial neural networks to assessment of ship manoeuvrability qualities." *Polish Maritime Research* 15.2 (2008): 15-21. DOI: 10.2478/v10012-007-0059-0
15. Martins, Paulo Triunfante, and Victor Lobo. "Estimating Maneuvering and Seakeeping Characteristics with Neural Networks." *OCEANS 2007-Europe*. IEEE, 2007: 1-5.
16. Ning, Wang, Wang Dan, and Li Tieshan. "A novel vessel maneuvering model via GEBF based fuzzy neural networks." *Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese*. IEEE, 2012: 7026-7031.
17. Valcic, Marko, Radovan Antonic, and Vinko Tomas. "Anfis Based Model for Ship Speed Prediction." *BrodoGradnja* 62.4 (2011): 373–382.
18. Deryabin, V.V. "Neural network implementation in vessel's dead reckoning model." *Ekspluatatsia morskogo transporta* 3 (2011): 20–27.
19. Konstantinova, E. A. Sistemy upravleniya dvizheniem morskikh sudov na osnove rekurrentnykh neuronnykh setey: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation, Admiral Nevelskoy Maritime State University. Vladivostok, 2012.
20. Wacławek, P. "A neural network to identify ship hydrodynamics coefficients." *Marine Simulation and Ship Manoeuvrability: Proceedings of the international conference, MARSIM '96, Copenhagen, Denmark, 9-13 September 1996, Rotterdam*. 1996: 509–513.
21. Sedova, N. A. Intelktualnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya sudnom po kursu: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation, Admiral Nevelskoy Maritime State University. Vladivostok, 2009.
22. Vediaikova, A. O. "Neural network approach for identification under external disturbance." *International Journal of Open Information Technologies* 2.3 (2014): 18–22.
23. Salmalian, K., and M. Soleimani. "ANFIS and Neural Network for Modeling and Prediction of Ship Squat in Shallow Waters." *International journal of mathematical models and methods in applied sciences* 5.4 (2011): 848–856.
24. Viytkalov, Y. L. Issledovanie problem sinteza neyrosetevogo kontrollera v zadache upravleniya kursom sudna: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation, Admiral Nevelskoy Maritime State University. Vladivostok, 2006.
25. Yang, X. J., and X.R. Zhao. "Self-Organizing Neural-Net Control of Ship's Horizontal Motion." *Journal of Physics: Conference Series* 48 (2006): 1284–1288.
26. Pipchenko, A.D. "Razrabotka robustnogo regulatora kursa sudna na baze teorii iskusstvennykh neyronnykh setey." *Problemy tekhniki* 1 (2013): 1–6.
27. Podporin, S. A. "Ispolzovanie neyro-nechetkikh kontrollerov v sistemah upravleniya dvizheniem morskikh sudov." *Sbornik nauchnykh prac Harkivskogo universitety Povitryannykh Sil* 4(33) (2012): 181–187.
28. Pathan, D. M., T. Hussain, J. Daudpoto, and I.A. Memon. "Neural Network Steering Controller For A Ship." *Sindh. Univ. Jour. (Sci. Ser.)* 44.3 (2012): 399–404.
29. Khizer, Arab Nighat, Dai Yaping, and M.A. Unar. "Design of Heading Controller for Cargo Ship using Feed Forward Artificial Neural Network." *International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT)* 5.9 (2013): 556-566. DOI:10.4156/ijact.vol5.issue9.66
30. Minghui, Wang, Yu Yongquan, and Lin Wei. "Adaptive Neural-Based Fuzzy Inference System Approach Applied to Steering Control." *Advances in Neural Networks — ISSN 2009*. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 1189–1196.
31. Yongqiang, Zhuo, and G.E. Hearn. "Ship intelligent autopilot in narrow water." *Control Conference, 2008. CCC 2008. 27th Chinese*. IEEE, 2008:243–248.
32. Zhang, Xian-Ku, Yi-Cheng Jin, and GeGuo. "Anfis Applied to a Ship Autopilot Design." *Machine Learning and Cybernetics, 2006 International Conference on*. IEEE, 2006: 2233–2236.
33. Lee, Sin-Der, Ching-Yaw Tzeng, and Wen-Wei Huang. "Ship Steering Autopilot Based on ANFIS Framework and Conditional Tuning Scheme." *Marine Engineering Frontiers (MEF)* 1.3 (2013): 53–62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gmavitder@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin Victor Vladimirovich —
PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gmavitder@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2015.

УДК 656.1

А. В. Галин

**ОБОБЩЕННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ПОРТОВ**

В работе рассмотрены существующие модели развития портов и терминалов, движущие силы и ограничения, определяющие этот процесс. Выявлены причины интереса транспортного сообщества к моделированию развития портов. Определена необходимость создания модели нового типа портового развития и требования, которым она должна соответствовать. Обоснован выбор методической основы, опирающейся на грузоведческие аспекты портовых операций. Выделены основные действующие факторы, изучено их индивидуальное и совместное влияние на порт как единую систему. Разработан и обоснован алгоритм работы имитационной модели. Проведены испытания работы модели при различных вариантах развития грузопотоков. Определена адекватность работы имитационной модели. Показано, что модель, предложенная в работе, является математическим аппаратом. Модель не только объясняет существующее состояние порта и причины, приведшие к нему, но и дает определенный прогноз развития в будущем, что является наиболее ценным для практического применения.

Ключевые слова: порт, терминал, имитационная модель, логистика.

Введение

Теоретические подходы к развитию портов формировались на протяжении многих лет, в течение которых различные исследователи пытались объяснить комплексный процесс портового развития путем предложения различных моделей, имеющих качественный, дескриптивный характер. Если бы теория развития портов имела сугубо описательный характер и ее целью являлся анализ того, как и почему тот или иной порт достиг своего состояния развития, то этого могло бы быть достаточно [1] – [8]. К сожалению, в отличие от теории, на практике, в лице более чем прагматичных специалистов по управлению портами, требуется не ретроспективное объяснение причин создавшейся ситуации и их влияния на характеристики того или иного порта, а то, что обычно является необходимым в прикладной теории — практические рекомендации по выбору направлений развития и установлению ограничений его возможностей [9]. В данной работе предпринята попытка построения на основе одной из наиболее известных качественных моделей — *модели количественной*. Использование ее позволит не только выполнять качественный и количественный анализ процесса развития порта, но и осуществлять прогнозирование результатов наиболее вероятных направлений развития порта.

Основная часть

В качестве методической основы в работе взята дескриптивная модель, предложенная Конференцией ООН по торговле и развитию (UNCTAD) в 1985 г. [8]. Эта модель воплотила концепцию

развития портов, обобщающую полученные различными учеными и специалистами результаты, делая основной упор на грузоведческих аспектах портовых операций. Представленная концепция основывалась как на широко известной модели Берда [3], так и на том, что движущей силой развития портов является рост объемов и изменение структуры грузопотоков [8]. В соответствии с данной концепцией предлагалось выделять в развитии портов пять фаз [9], которые обычно проходит порт в процессе своего развития (рис. 1). В условном виде ширина прямоугольных блоков на рисунке отражает суммарную длину соответствующих причалов, а высота — грузооборот через них.

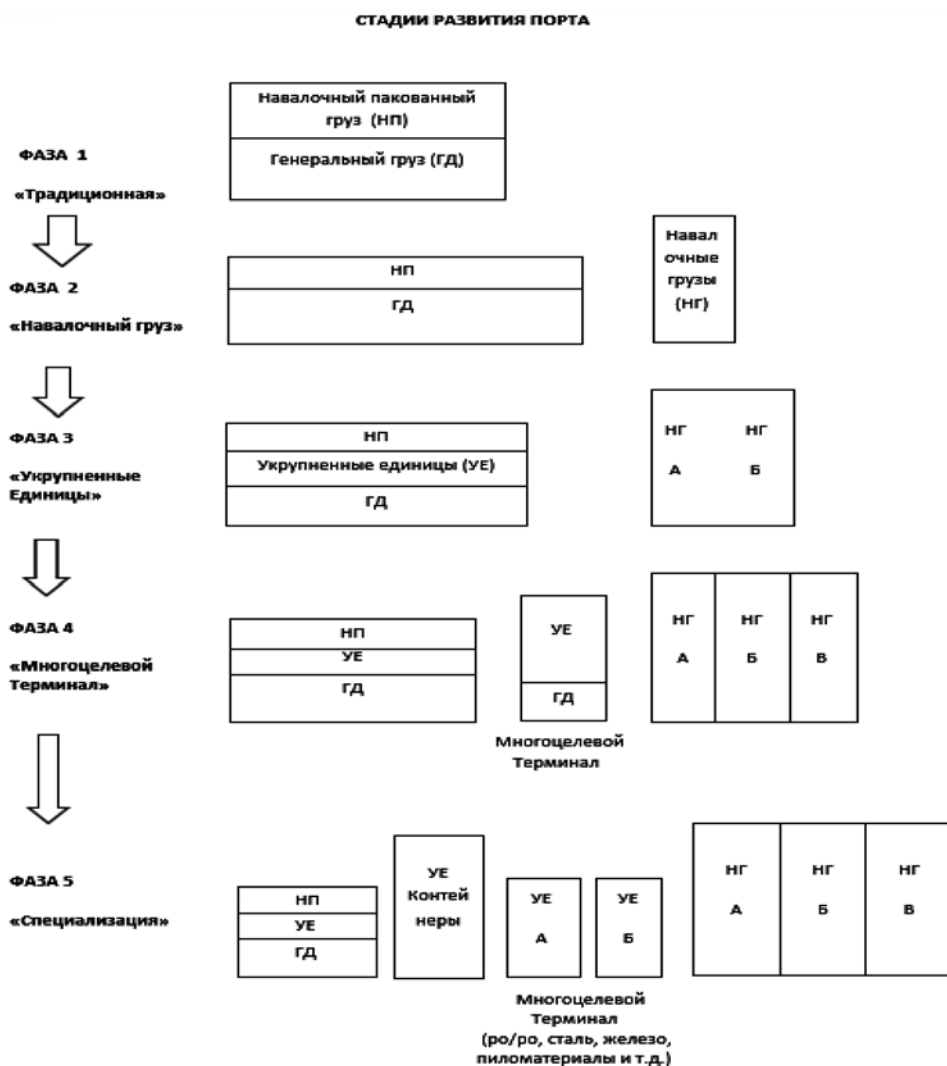


Рис. 1. Модель развития порта

Фаза 1. Конвенциональный (традиционный) порт. На этом этапе развития порт представляет собой группу причалов общего назначения, способных переваливать генеральный груз, т. е. штучные и навалочные грузы в упакованном виде (например, пшеница в мешках, нефть в бочках, удобрения в пакетах).

Фаза 2. Появление навалочного груза. При достижении размеров партий навалочного груза определенного порога и развитии судостроения, экономически целесообразной становится перевозка груза навалочным способом на специализированных судах-балкерах. За счет этого из общей массы тарно-штучных грузов выделяется частный грузопоток нового вида — навалочного груза, для обработки которого порт должен предоставить отдельный причал со специализированным подъемно-перегрузочным оборудованием. Таким образом, объективно необходимым становится появление терминала навалочных грузов. Параллельно на этом этапе проводятся модернизация

оборудования для перегрузки генерального груза и увеличение длины причальной линии как следствие постоянного роста грузопотоком и размеров судов.

Фаза 3. Появление укрупненных грузовых единиц (УГЕ). Данный этап характеризуется двумя основными тенденциями. Первая тенденция — это появление средств укрупнения тарноштучных грузов: паллеты, биг-бэги, ящики, крейты, контейнеры, пакеты (металл в пакетах, паке-тированные пиломатериалы, трубы в связках и др.). Вначале они представляют небольшую долю грузопотока, и обработка данного вида груза происходит на причалах генеральных грузов, а перевозка — на конвенциональных судах. Вторая тенденция состоит в постоянном снижении объема генерального груза за счет выделения из него новых объемов навалочных грузов. Одновременно объемы навалочных грузов достигают значения, когда для различных видов навалочных грузов требуются разные терминалы.

Фаза 4. Транзитивный многоцелевой терминал. Рост использования УГЕ и появление специализированных судов для их перевозки (лесовозы, автомобилевозы, ро-ро суда, контейнеровозы ячеистого типа и др.) требуют специального перегрузочного оборудования для обслуживания. В то же время, грузопотоки каждого вида УГЕ невелики, а приоритет определенной УГЕ в будущем грузопотоке неясен, что обуславливает потребность в гибком многоцелевом терминале, который сможет заменить часть старых причалов для генеральных грузов. Этот терминал с более или менее приемлемым качеством справляется со всеми категориями груза и легко может быть превращен в специализированный терминал для того груза, который окажется приоритетным в ближайшем будущем. Параллельно на данном этапе продолжается рост и диверсификация грузопотока сухих навалочных грузов.

Фаза 5. Специализация терминалов. Конечным этапом развития любого вида грузопотока является достижение им такого объема, когда целесообразным является использование специализированного флота для его перевозки морем и специализированных терминалов для его обработки в порту. В этом случае многоцелевые терминалы легко конвертируются в специализированные для переработки данного груза путем закупки дополнительного и незначительно модифицированного оборудования. Ко времени достижения данного этапа развития остаточный объем генерального груза значительно сокращается, а обработка основных альтернативных грузов (лес, чугун, сталь) группируется на многоцелевых терминалах.

Концепция количественной модели. Указанные качественные модели являются основой для разработки концепции количественной модели, главной гносеологической задачей которой является прогнозирование развития порта. Именно это необходимо специалистам порта для принятия управленческих решений о способах и выборе направлений развития порта. При построении модели постулировалось положение о том, что развитие порта происходит под влиянием внешнего побудительного воздействия [10], [11]. В роли такого внешнего воздействия выступает грузопоток, изменение которого принуждает проводить определенные изменения в работе порта. Грузопоток может изменяться не только количественно, увеличиваясь или уменьшаясь со временем, он может изменяться качественно. С развитием производства появляются новые виды грузопотоков (например, укрупненные единицы или контейнеры), разрабатываются новые типы судов для удешевления перевозки уже существующих видов груза, требующие новых способов перевалки (например, навалочные, наливные грузы и т. д.).

Грузопоток Q в представленной модели развития порта является обобщенной независимой переменной, потребностью, которую необходимо удовлетворить. В модель заложена возможность структурного изменения типов грузопотоков Q_n как исходных данных, а также возможность изменения процентного соотношения составляющих грузопотоков, которое может меняться в зависимости от сложившейся ситуации.

Принцип выделения отдельного грузопотока из общей массы груза связан с возможностью использования для его перевозки специализированного судна. Выделение грузопотока в самостоятельный (отдельный) вид происходит в тот момент, когда объем этого груза становится достаточным для использования специализированного судна. На основании возможности использования

судна выделяется (создается) специализированный причал, так как эффективная обработка специализированного судна возможна только на специализированном причале. Т. е. в определенный момент времени t_n возникает потребность в специализированном судне и, следовательно, под это судно выделяется причал. До этого момента груз, в силу своего незначительного количества, вначале обрабатывается на причале для переработки того грузопотока, из которого он выделился, и затем перевозится на соответствующем типе судна.

В модель введен управляемый параметр «задаваемая грузоподъемность судна» D_n и разработан алгоритм выделения грузопотока в момент времени t_n (рис. 2) при достижении грузопотоком такого размера Q_n , когда может использоваться специализированное судно, начинается его использование, и выделяется (строится) специализированный причал для обработки судна. В модели предусмотрена возможность изменения типа и грузоподъемности судов, т. е. существует возможность выполнения расчетов для различных типоразмеров судов в зависимости от портовых ограничений и наличия определенного свободного тоннажа на рынке.

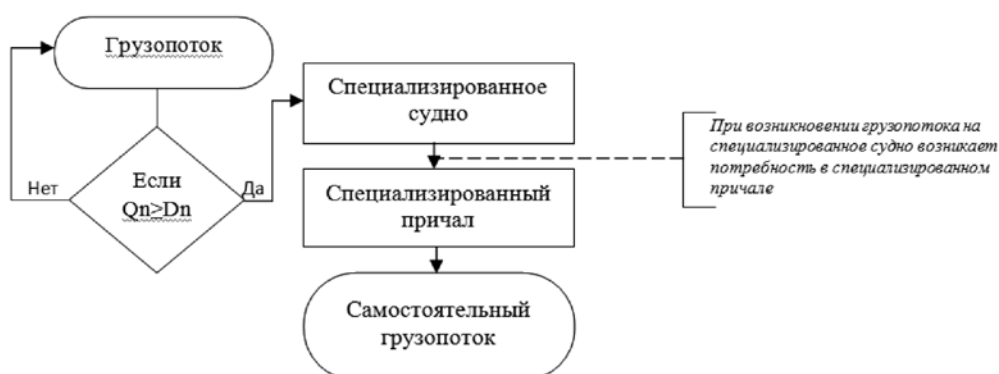


Рис. 2. Блок-схема выделения грузопотока:

Q_n — грузопоток определенного вида;

D_n — грузоподъемность специализированного судна

Установление адекватности работы модели. С помощью использования созданной модели были выполнены расчеты и рассмотрена динамика изменения структуры грузопотоков по специализированным причалам на основе пяти выбранных грузопотоков: генеральный груз, навалочный, наливной, укрупненных грузовых единиц и контейнеров, и определенных типоразмеров судов. Для проведения расчетов было выбрано три варианта развития грузопотока, а также использован вариант изменения размеров судов и скорости их обработки.

Вариант 1. Равномерное развитие грузопотоков. В этом варианте рассмотрено равномерное развитие грузопотоков, их динамика приведена на рис. 3.

График «Грузопоток через причал для генерального груза» отражает первичность существования грузопотока через причал для обработки генеральных грузов, последовательное выделение из него укрупненных грузовых единиц, навалочного и наливного груза, что приводит к замедлению роста грузопотока через причал для генеральных грузов, а потом к его падению. С общим ростом грузопотока рост грузопотока через причал для генеральных грузов возобновляется, но уже с гораздо меньшей интенсивностью.

График «Наливной и навалочный грузопотоки». С достижением определенного размера грузопотока, достаточного для использования специализированного судна, вначале происходит выделение грузопотоков для обработки на соответствующих причалах, а затем — их самостоятельное развитие.

График «Грузопоток через причал для укрупненных единиц». Общая тенденция развития грузопотока схожа с грузопотоком через причал для генеральных грузов. Изменение грузопотока является плавным и не таким значительным, так как из него выделяется только поток контейнеризованных грузов.

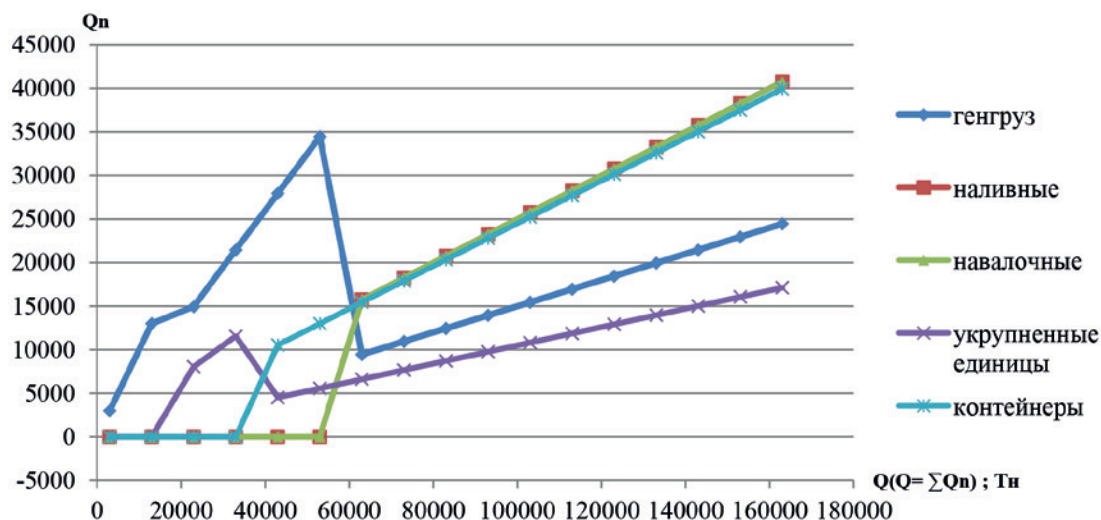


Рис. 3. Графики распределения грузопотоков по специализированным причалам на основании равномерного развития

График «Контейнерный грузопоток». Контейнеризированный грузопоток выделяется из грузопотока, обрабатываемого на причале для укрупненного груза. Поведение этих двух грузопотоков схоже с описанным выше поведением грузопотоков через причал для генеральных грузов и укрупненных грузовых единиц.

На основе полученных данных, на рис. 4 представлено визуальное развитие порта во времени под влиянием изменения грузопотока. Высота прямоугольников схематично отражает размер определенного грузопотока.

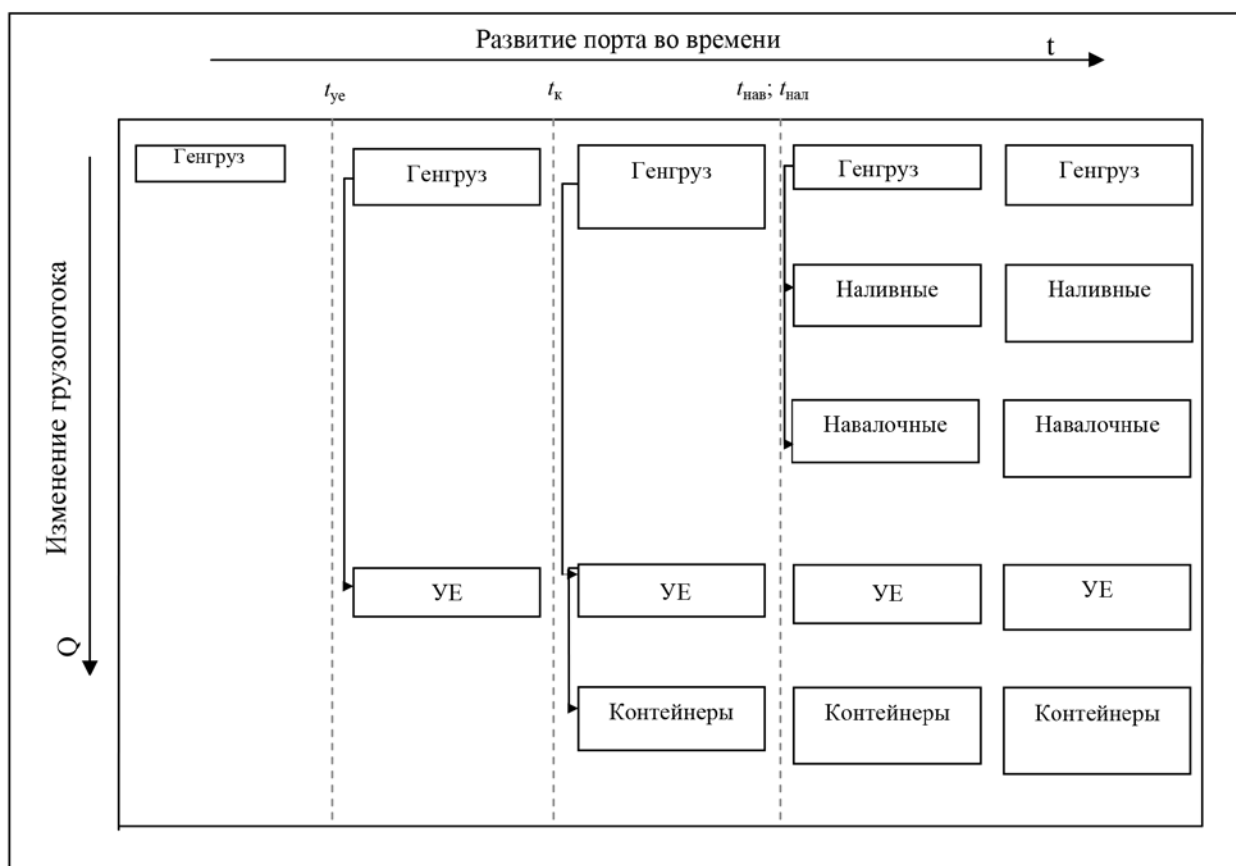


Рис. 4. Схема развития порта во времени с изменением грузопотока

Вариант 2. Приоритетное развитие контейнерного грузопотока. В этом варианте расчета рассмотрено возможное ускоренное развитие одного из грузопотоков, а именно контейнеризированных грузов (рис. 5).

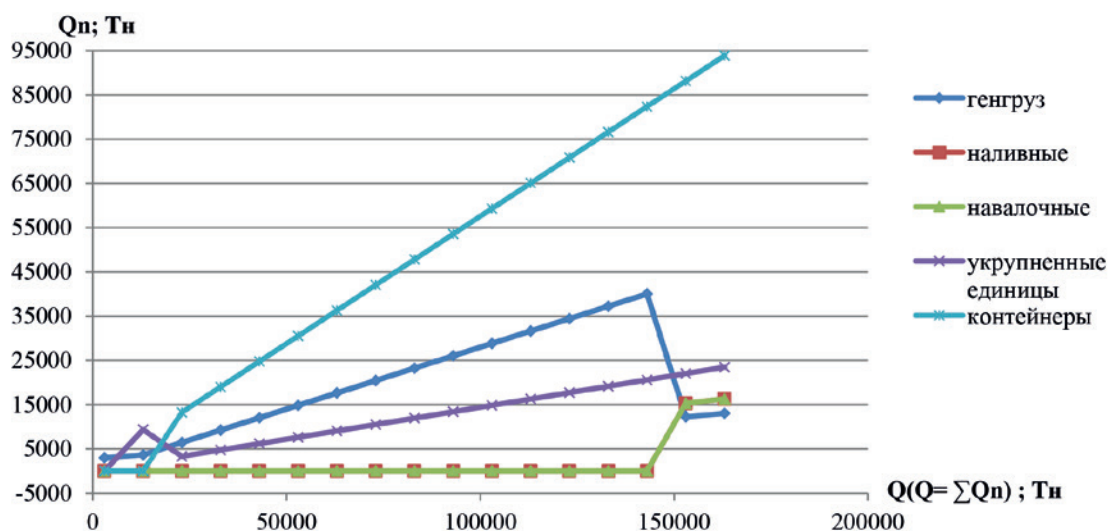


Рис. 5. Графики распределения грузопотоков по причалам на основании приоритетного развития одного из потоков

По сравнению с распределением на основании первоначальных параметров заметно более раннее выделение грузопотока укрупненных единиц и, соответственно, выделение контейнеризированного груза, а также его дальнейший активный рост. Развитие других типов груза происходит замедленно и выделение грузопотоков для обработки на других специализированных причалах происходит гораздо позже. На рис. 6 приведено визуальное развитие порта при доминировании контейнеризированного груза.

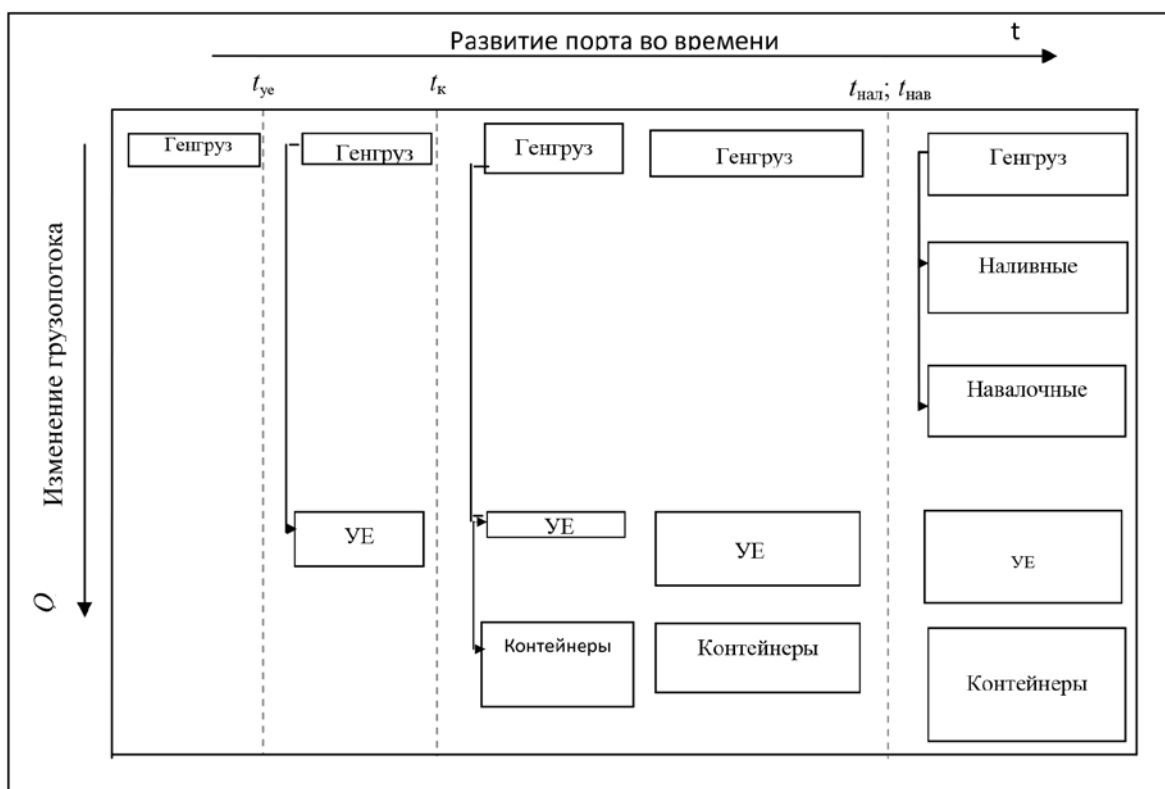


Рис. 6. Схема развития порта при доминировании контейнеризированного груза

Вариант 3. Развитие порта при изменении размеров судов и скорости их обработки.

В этом варианте расчета представлено развитие порта при изменении размеров судов и скорости их обработки (рис. 7). Показано, что при изменении размеров судов (уменьшении) происходит более раннее выделение грузов для обработки на специализированных причалах. Это связано с возможностью скорейшего использования специализированного флота, а следовательно, и обработки грузов на специализированных причалах. При увеличении размера специализированных судов будет наблюдаться обратная картина.

Рост скорости обработки судов ведет к уменьшению времени рейса, а следовательно, к уменьшению количества используемых судов, увеличению количества обрабатываемого груза / судов на причале и уменьшению потребного количества причалов. Уменьшение скорости обработки судов ведет к обратной картине.

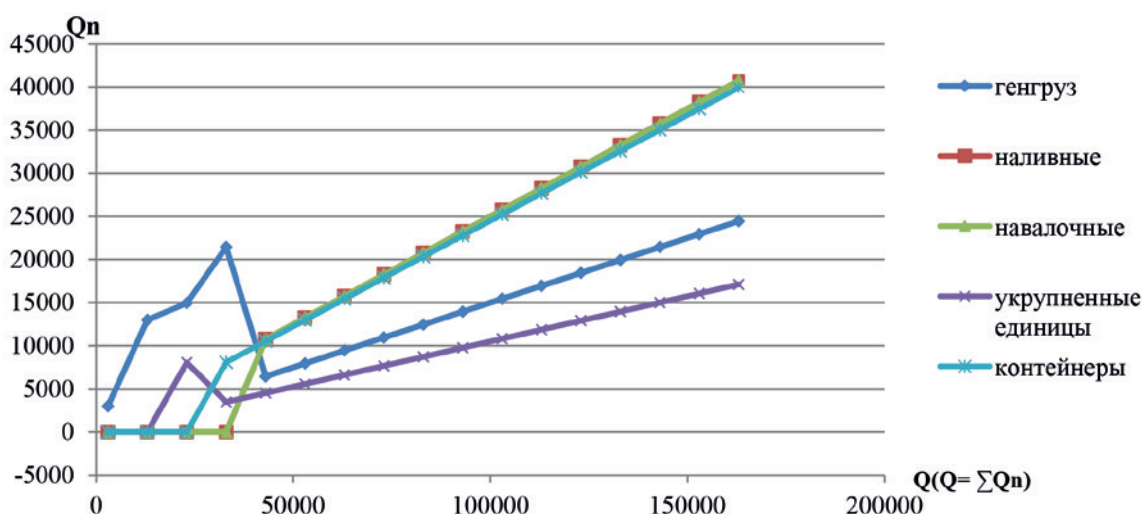


Рис. 7. Графики распределения грузопотоков по специализированным причалам при уменьшении размера судов и более высокой скорости их обработки

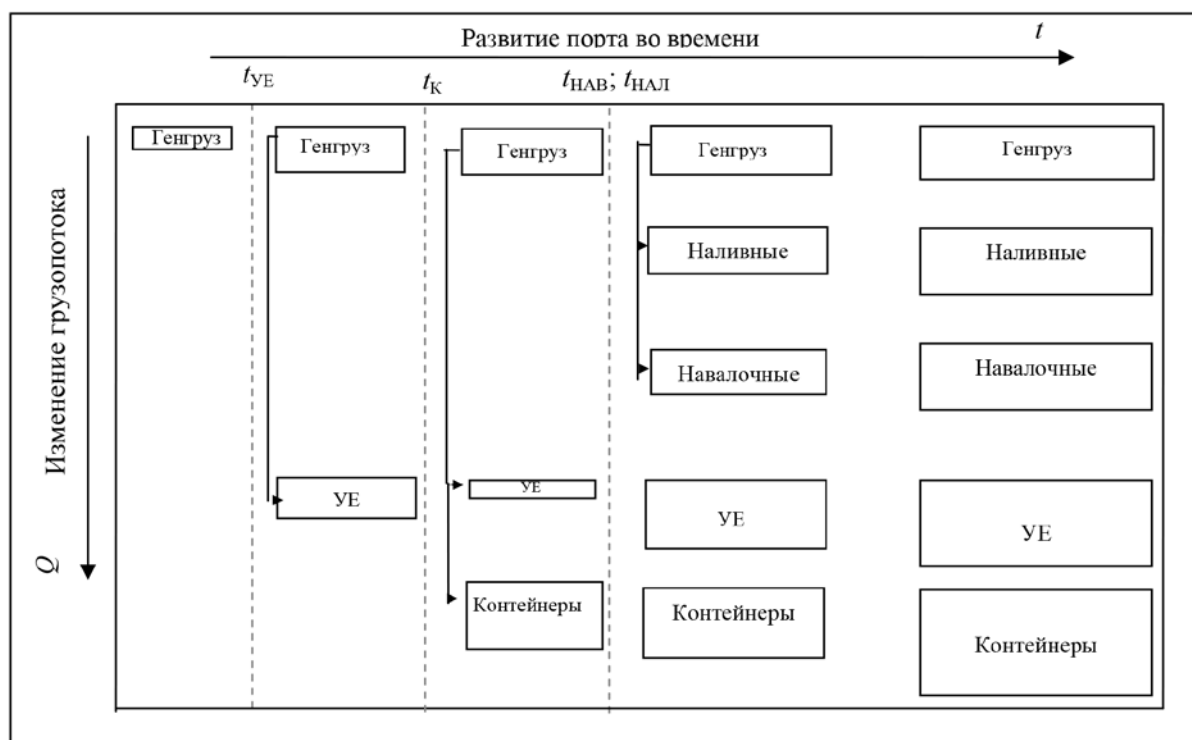


Рис. 8. Схема развития порта при изменении параметров судов и сроков обработки

На основе полученных данных представлено визуальное развитие порта во времени под влиянием воздействия внешних факторов. Высота прямоугольника схематично отражает размер определенного грузопотока (рис. 8).

Выводы

В качестве методологической основы исследования выбрана модель развития портов, предложенная Конференцией ООН по торговле и развитию (UNCTAD), базирующаяся на грузоведческих аспектах портовых операций. Грузопоток Q в представленной модели развития порта является обобщенной независимой переменной, а также потребностью, которую необходимо удовлетворить.

Развитие порта базируется на принципе выделения отдельного грузопотока из общей массы груза. Данный принцип связан с возможностью использования для перевозки груза специализированного судна, обработка которого, в свою очередь, требует специализированного причала. На основе этого разработан алгоритм функционирования имитационной модели и проведены испытания ее работы.

Результаты проверки работы модели в различных условиях развития грузопотоков наглядно продемонстрировали следующее:

- модель адекватно отражает этапы развития порта;
- модель отражает изменения в развитии порта при количественном и качественном изменении грузопотока;
- модель демонстрирует ускорение или замедление развития порта при соответствующем изменении грузопотока;
- с помощью данной модели, на основе данных о росте грузопотоков, используемом специализированном флоте и перегрузочном оборудовании, стало возможным определять время введения в эксплуатацию новых перегрузочных комплексов.

Предложенная в настоящей работе модель является математическим аппаратом и способна не только объяснить существующее состояние порта и причины, приведшие к этому, но и дать определенный прогноз развития в будущем, что является наиболее ценным для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pesquera M. A.* UNCTAD monographs on port management. Sustainable development strategies for cities and ports / M. A. Pesquera, J. R. Ruiz. — New York and Geneva: United Nation, 1996. — 41 p.
2. *Bird J.* Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.
3. *Notteboom T. E.* Port regionalization: towards a new phase in port development / T. E. Notteboom, J. P. Rodrigue // *Maritime Policy & Management*. — 2005. — Vol. 32. — № 3. — Pp. 297–313. DOI:10.1016/j.retrec.2009.12.004.
4. *Beresford A. K.* The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution? / A. K. C. Beresford, B. M. Gardner, S. J. Pettit, A. Naniopoulos, C. F. Wooldridge // *Maritime Policy & Management*. — 2004. — Vol. 31. — № 2. — Pp. 93–107.
5. *Roso V.* Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note / V. Roso // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2007. — Vol. 12. — № 7. — Pp. 523–527.
6. *Bichou K.* A logistics and supply chain management approach to port performance measurement / K. Bichou, R. Gray // *Maritime Policy & Management*. — 2004. — Vol. 31. — № 1. — Pp. 47–67.
7. *Roso V.* A review of dry ports / V. Roso, K. Lumsden // *Maritime Economics & Logistics*. — 2010. — Vol. 12. — № 2. — Pp. 196–213.
8. *Port development*. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
9. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 2 (30). — С. 141–153.
10. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2008. — № 2. — С. 18–20.

11. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент проектирования морских и наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, В. А. Блудкина // Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 237–240.

GENERALIZED IMITATION MODEL OF PORTS DEVELOPMENT PROCESS

The models for ports and terminals development are treated, as well as main driving forces and constraints affecting these processes. The reasons of interest to the ports models development are explained. The need to create a model of a new type of port development was identified as well as requirements to be met. The choice of methodological framework, based on cargo aspects of port operations was done. It were identified the basic acting factors, studied their individual and joint impact on the port as a unified system. Algorithm of the imitation model was developed and proved. Tests of the model with different kinds of cargo flows were done. The adequacy of the simulation model was determined. It is shown that the model proposed in the paper is a mathematical one. Model is able not only to explain existing condition of the port and the causes that led up to it, but also to give a certain prediction of the development in the future, which is the most valuable for practical application.

Keywords: port, terminal, imitation model, logistics.

REFERENCES

1. Pesquera M. A., and J. R. Ruiz. *UNCTAD monographs on port management. Sustainable development strategies for cities and ports*. New York and Geneva: United Nation, 1996.
2. Bird J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.
3. Notteboom, Theo E., and Jean-Paul Rodrigue. "Port regionalization: towards a new phase in port development." *Maritime Policy & Management* 32.3 (2005): 297–313.
4. Beresford, Anthony Kenneth Charles, B. M. Gardner, S. J. Pettit, A. Naniopoulos, and C. F. Wooldridge. "The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution?" *Maritime Policy & Management* 31.2 (2004): 93–107.
5. Roso, Violeta. "Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12.7 (2007): 523–527.
6. Bichou, Khalid, and Richard Gray. "A logistics and supply chain management approach to port performance measurement." *Maritime Policy & Management* 31.1 (2004): 47–67.
7. Roso, Violeta, and Kent Lumsden. "A review of dry ports." *Maritime Economics & Logistics* 12.2 (2010): 196–213.
8. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
9. Kuznecov, A. L., and A. V. Galin. "The genesis of port development models in modern transportation science." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153.
10. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. "Basic model of logistical flows through container terminal." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
11. Kuznecov, A. L., and V. A. Bludkina. "Imitacionnoe modelirovanie kak instrument proektirovanija morskikh i nazemnyh kontejnernih terminalov." *Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2008: 237–240.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Галин Александр Валентинович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
Galin2403@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Galin Aleksandr Valentinovic —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Galin2403@gmail.com

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОХОДОВ МЕЖДУ СТЕЛЛАЖАМИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СКЛАДА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Перевалочные склады, располагающиеся в пунктах перегрузки грузов с водного транспорта на другие, выполняют важные функции по преобразованию грузопотоков с целью дальнейшего наиболее эффективного их транспортирования. Расположение стеллажей и продольных проходов между ними имеют большое значение в работе перевалочного склада. Вопросам оптимального хранения грузов посвящено большое число работ, вместе с тем «нестандартные» схемы расположения проходов между стеллажами в научной литературе рассматриваются крайне редко, поэтому тему статьи можно признать актуальной. Как правило, стеллажи и продольные проходы располагаются перпендикулярно друг другу, в статье предлагаются варианты расположения с «евклидовым преимуществом». Вариант с криволинейным расположением проходов между стеллажами имеет как достоинства, так и ряд недостатков и имеет определенную сферу применения. При криволинейном расположении проходов происходит сокращение полезной вместимости склада, но также сокращается пробег погрузчика от погрузочно-разгрузочных участков до зоны хранения. Поиску оптимального соотношения между вместимостью и пробегом погрузчика посвящена эта статья. Сокращение пробега погрузчика при предложенных схемах достигает 18 %, однако и ёмкость склада может также упасть до 9 %. Впервые в научной литературе выполнены числовые расчеты подобного склада.

Ключевые слова: склад, место хранения, показатели склада, вместимость, пробег погрузчика.

Введение

Организованная цепь поставок от производителя к конечному потребителю используется торговыми компаниями для доставки готовой продукции в нужное время в нужном количестве по низкой цене. При этом удовлетворенность потребителей является одним из наиболее важных факторов, влияющих на конкурентные преимущества компании. Например, если компания закупает сырьё в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, а затем производит из этого сырья товары для сбыта в Европе, то ей необходимо иметь несколько типов складских помещений (перевалочные, склады торговых и промышленных предприятий) для своевременной поставки продукции. В большинстве случаев сырьё и готовая продукция доставляется водным транспортом, который является ключевым при международных перевозках грузов во всем мире [1], [2]. Склады, располагающиеся в пунктах перегрузки грузов с водного вида транспорта на другие, выполняют важные функции по преобразованию грузопотоков с целью дальнейшего наиболее эффективного транспортирования грузов. Эффективность всей цепи поставки существенно зависит от того, насколько хорошо оснащены и организованы эти промежуточные перевалочные склады на транспорте [3].

1. Применение новых схем размещения проходов стеллажей в перевалочном складе

Размеры складских помещений по всей стране увеличиваются, увеличиваются и эксплуатационные расходы на перемещения грузов в зоне хранения перевалочного склада [4] – [9]. Затраты переносятся на клиентов, которые в связи с этим зачастую завышают цены на свою продукцию. Таким образом, целью этой работы является изучение возможностей сокращения эксплуатационных расходов перегрузочного склада за счет изменения конструктивных схем расположения проходов между стеллажами на складе штучных грузов.

Как правило, стеллажи и продольные проходы в перевалочных складах тарно-штучных грузов расположены перпендикулярно друг другу, как показано на рис. 1.

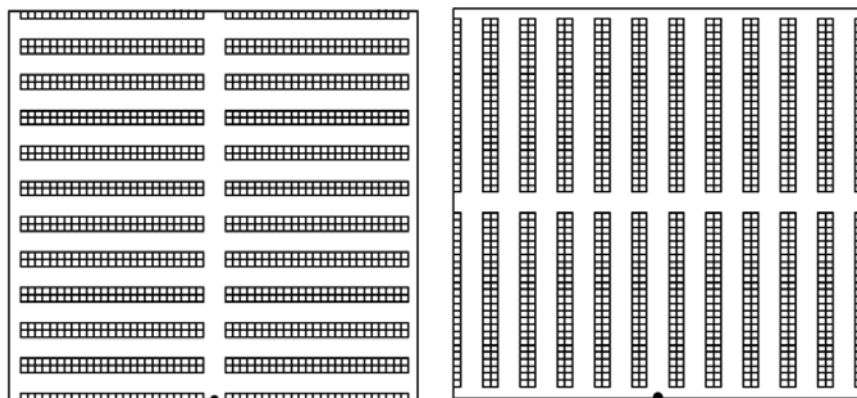


Рис. 1. Традиционные перевалочные склады, оборудованные каркасными стеллажами

Традиционное расположение стеллажей имеет свои достоинства (количество мест хранения для тарно-штучных грузов), и недостатки (недостаточная оптимизация эксплуатационных расходов, связанных с расстоянием от погрузочно-разгрузочных участков до мест хранения). Это и натолкнуло на мысль о более эффективной схеме размещения проходов и стеллажей [10]. Значительный эффект может быть получен путём радикального изменения схемы размещения проходов и стеллажей, которая была предложена зарубежными учеными. *V*-образный тип имеет изогнутый поперечный проход, который позволит уменьшить расстояние, проходимое за полный цикл погрузчиком от погрузочно-разгрузочного участка до мест хранения за счёт евклидова преимущества (рис. 2, *а*). Одним из недостатков является то, что погрузчику необходимо делать крутой поворот при входе в нижнюю часть склада. Для устранения этого недостатка стоит разместить нижнюю часть поперечно относительно основной части склада (рис. 2, *б*). Тем самым можно создать благоприятные условия для разворота погрузчика.

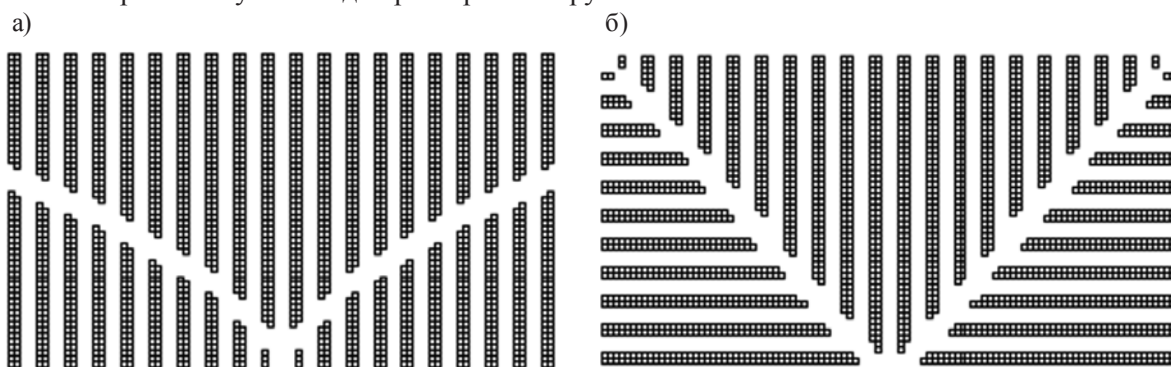


Рис. 2. Схемы расположения проходов и стеллажей:
а — *V*-образное расположение проходов; *б* — ёлочный тип размещения стеллажей

2. Определение параметров зоны хранения перевалочного склада

При проектировании зоны хранения нужно выбрать наилучший способ складирования грузов, тип и параметры складских единиц, стеллажного оборудования. При этом необходимо обеспечить не только полное заполнение грузами, но и минимальные затраты при перемещении груза внутри склада. Ёмкость склада тарно-штучных грузов определяется по формуле

$$R = x \cdot y \cdot z, \quad (1)$$

где x — число поддонов, располагаемое по ширине складского здания; y — число поддонов по длине стеллажей зоны хранения; z — число ярусов по высоте.

Максимальное количество стеллажей по ширине определяется по формулам:

– для традиционного склада

$$x = 2\varepsilon \left\{ \frac{B \cdot \xi_c - B_0}{B_m + 2(b + \lambda)} \right\}; \quad (2)$$

– для склада *V*-образным расположением прохода

$$x = 2\varepsilon \left\{ \frac{B \cdot \xi_c - B_0 - 2(b + \lambda) \cdot \cos \alpha}{B_m + 2(b + \lambda)} \right\}, \quad (3)$$

где 2 — количество стеллажей в секции, состоящей из двух стеллажей и прохода между ними; B — ширина пролёта складского здания; ξ_c — коэффициент длины стеллажей, учитывающий то обстоятельство, что часть длины склада может занимать приёмо-отправочная экспедиция (для варианта, показанного на рис. 3, *а*, в первом приближении принимается $\xi_c = 0,8$, это означает, что экспедиция занимает 20 % от длины здания; если экспедиция расположена вдоль всей длины склада со стороны подхода автотранспорта и железнодорожного транспорта, как показано на рис. 3, *б*, принимается $\xi_c = 1$); B_0 — часть ширины пролёта складского здания, которая не может быть занята стеллажами (включает ширину колонн здания, зазоры от колонны до крайнего стеллажа или выступающего из него груза и т. д.); B_m — ширина продольного прохода между стеллажами для штабелирующей машины, м; b — длина стандартного поддона 1200×800 мм, м (поддоны рекомендуется устанавливать длинной стороной 1200 мм в глубину стеллажа для получения наибольшей ёмкости склада); λ — зазор между поддонами в двухстороннем стеллаже и между поддоном и конструкцией стеллажа, м (принимается $\lambda = 0,05$); $\varepsilon\{\dots\}$ — обозначения целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в скобках (округление в меньшую сторону целого числа).

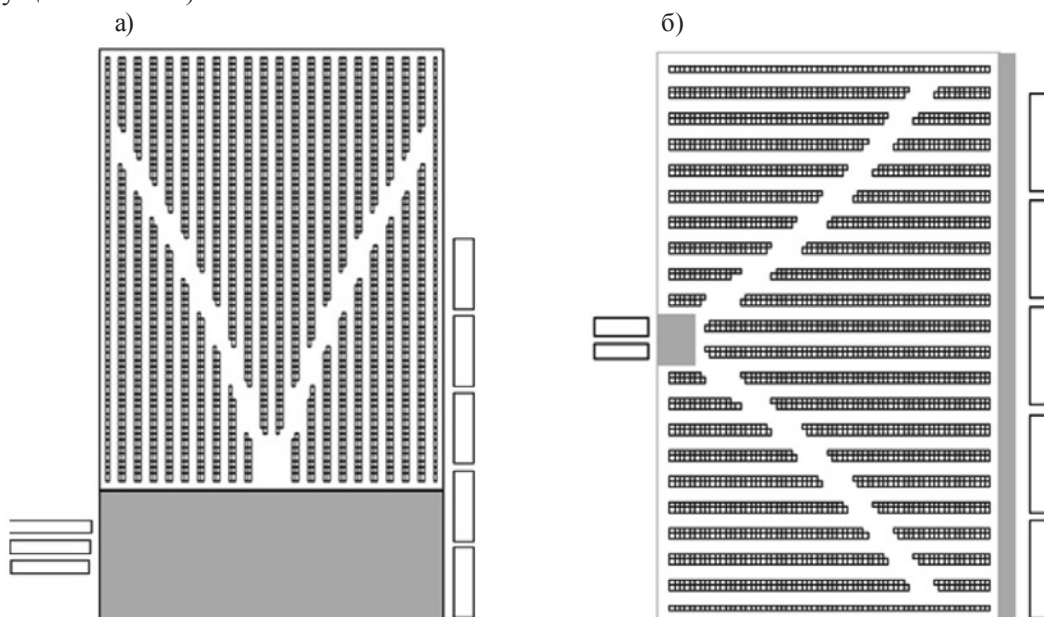


Рис. 3. Варианты расположения приёмо-отправочной экспедиции на складе:
а — в торце; *б* — вдоль склада

Количество поддонов по длине обслуживания стеллажей погрузчиком определяется по формулам:

– для традиционного склада

$$y = 3\varepsilon \left\{ \frac{L \cdot \xi_c - n_{np} \cdot B_{np}}{2,8} \right\}; \quad (4)$$

– для склада V -образным расположением прохода

$$y = 3\varepsilon \left\{ \frac{L \cdot \xi_c - B_{\text{пр}}}{2,8} \right\}, \quad (5)$$

где 3 — количество поддонов 1200×800 мм, помещающихся в стандартную ячейку длиной 2800 мм при укладках их стороной 1200 мм в глубину стеллажей (такая установка поддонов позволяет получить ёмкость стеллажей на 10 – 15 % больше по сравнению с установкой поддонов стороной 800 мм в глубину стеллажей); L — длина складского здания, м; ξ_c — коэффициент длины стеллажей, учитывающий, что часть длины склада может занимать приёмо-отправочная экспедиция (для варианта, показанного на рис. 3, а, в первом приближении принимается $\xi_c = 0,8$, это означает, что экспедиция занимает 20 % от длины здания; если экспедиция расположена вдоль всей длины склада со стороны подхода автотранспорта и железнодорожного транспорта, как показано на рис. 3, б, принимается $\xi_c = 1$); $n_{\text{пр}}$ — количество поперечных проходов по длине склада (принимается $n_{\text{пр}} = 40$ — 50 м); в случае, если поперечные проходы предусматриваются сквозь стеллажи по первым двум ярусам, $n_{\text{пр}} = 0$); $B_{\text{пр}}$ — ширина проходов по складу, м (принимается $B_{\text{пр}} = 3$ м); 2,8 м — длина ячейки стандартного каркасного стеллажа; $\varepsilon\{\dots\}$ — обозначения целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в скобках (округление в меньшую сторону целого числа).

Количество ярусов по высоте зоны хранения для существующего складского здания определяется в зависимости от полезной высоты H и высоты транспортного пакета по формуле

$$z = \varepsilon \left\{ \frac{H - 0,5 - C_{\text{я}}}{C_{\text{я}}} \right\} + 1, \quad (6)$$

где 0,5 — зазор между верхним грузом в стеллаже и низом ферм перекрытия (используется для установки трубопроводов, устройств освещения и т. д.); $C_{\text{я}}$ — высота яруса, м, определяется по формуле $C_{\text{я}} = 0,15 + c + e$ (где 0,15 м — высота плоского деревянного двухнастильного поддона; c — высота укладки груза на поддон; e — размер по высоте, равный толщине продольной балки каркасного стеллажа и зазор между грузом и низом этой балки следующего яруса по высоте $e = 0,2 - 0,3$ м); 1 — дополнительный верхний ярус.

Расчёт параметров зоны хранения для схем с ёлочным расположением стеллажей рассчитывается аналогично, как традиционный склад, который образует две прямоугольных фигуры с длиной L и шириной $B/2$. На основании расчётов параметров зоны хранения был разработан параметрический ряд перевалочного склада, в котором применены современные складские и подъёмно-транспортные оборудования. При применении схемы с V -образным расположением проходов процент потери мест хранения варьируются от 2 % до 5 % — в зависимости от габаритов перевалочного склада. При применении ёлочного типа размещения стеллажей ёмкость зоны хранения перевалочного склада сокращаются от 4 % до 9 %.

3. Определение пробега погрузчика

На рис. 4 пунктирной линией обозначено евклидово расстояние, а сплошная линия характеризует «манхэттенское».

В данном исследовании рассматриваются только горизонтальные перемещения по складу, не учитывается необходимость вертикального подъёма вилок погрузчика. Длина пути, проходимого погрузчиком от погрузочно-разгрузочного участка до мест хранения груза, определяется по формуле, предложенной Германом Минковским,

$$d_i(x, y) = \left[\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^q \right]^{\frac{1}{q}}, \quad (7)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — векторы перемещения погрузчика.

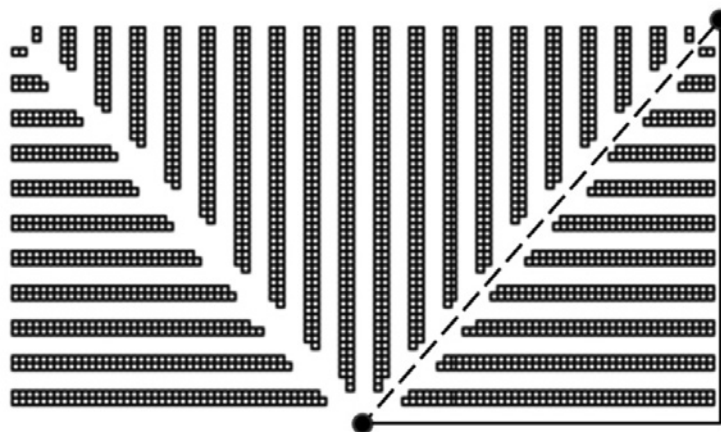


Рис. 4. Вектор перемещения погрузчика по складу

В указанное семейство расстояний входит:

- при $q = 1$ — «манхэттенское» расстояние;
- при $q = 2$ — евклидово расстояние.

Например, для евклидова расстояния, формула выглядит следующим образом

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (8)$$

Для «манхэттенского» расстояния

$$d_i(x, y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (9)$$

4. Определение вероятности спроса с помощью ABC-анализа

На сегодняшний день во многих источниках литературы описаны способы организации размещения товара с применением ABC-анализа. Этот метод можно применить для зоны основного хранения на перевалочном складе в случае неперпендикулярного размещения проходов между стеллажами. Местам хранения грузов присваивается категория ABC на основе удобства размещения в зоне хранения. Другими словами, если зона хранения грузов находится в удобном месте и недалеко от погрузочно-разгрузочных участков, ей присваивается категория А, и наоборот, если зона хранения грузов находится в удаленном месте, ей присваивается категория С (рис. 5).

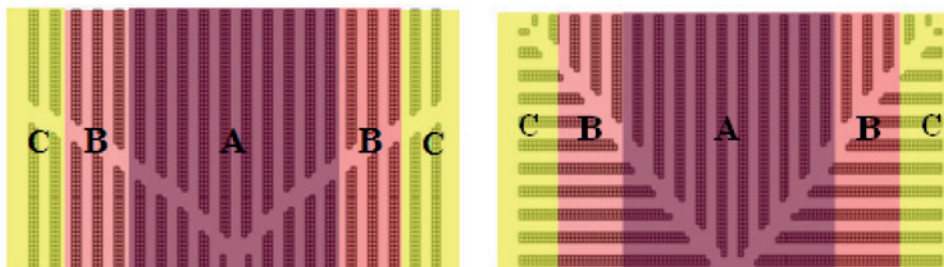


Рис. 5. Деление зоны хранения склада на основе ABC-анализа

5. Математическая модель определения пробега погрузчика по складу

$$D = 2 \sum_{i=1}^N d_i p_i, \quad (10)$$

где N — места, выделенные от общей ёмкости R хранения для размещения/извлечения тарноштучного груза; 2 — коэффициент, учитывающий необходимость движения погрузчика в обрат-

ном направлении; d_i — длина пути, проходимого погрузчиком от мест погрузки и разгрузки до мест основного хранения; p_i — вероятность посещения погрузчиком определенных мест хранения.

Проценты сокращения пробега погрузчика приведены на рис. 6.

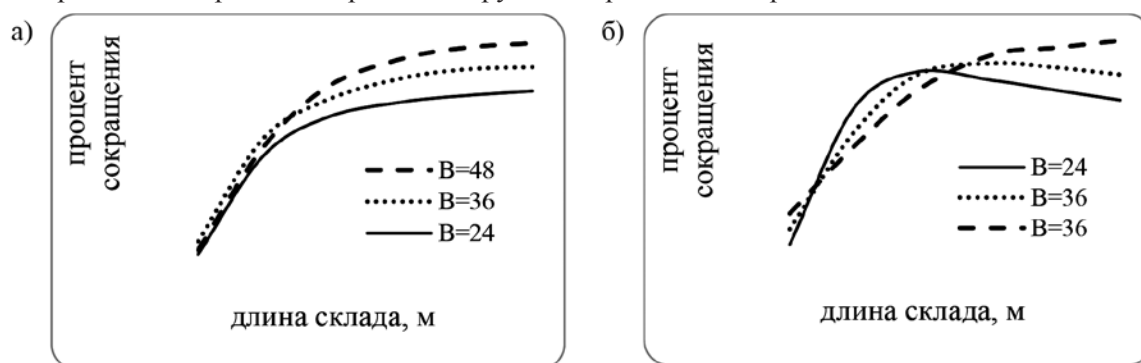


Рис. 6. Проценты сокращения пробега погрузчика:
а — для схемы с V-образным расположением проходов между стеллажами;
б — для схемы с ёлочным размещением проходов между стеллажами

6. Техничко-экономические расчёты

При проектировании реконструкции существующего склада после определения его возможной ёмкости R , количество поддонов, определяют перерабатывающую способность с учётом изменения схемы расположения проходов между стеллажами (годовой грузопоток в поддонах) перевалочного склада

$$Q_r = R \cdot \frac{365}{\tau}, \quad (11)$$

где τ — средний срок хранения грузов на складе.

Оборачиваемость грузов на складе

$$\eta = \frac{365}{\tau}. \quad (12)$$

Расходы на содержание стеллажей в зоне хранения $\mathcal{E}_c$, тыс. руб., определяется по формуле

$$\mathcal{E}_c = R \cdot S_c \cdot (2\% + 10\% + 2,2\%), \quad (13)$$

где S_c — удельная стоимость стеллажей в расчёте на один хранящийся поддон, тыс. руб.; 2 % — норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт стеллажей; 10 % — норма отчислений на текущие ремонты стеллажей; 2,2 % — ставка налога на имущество.

Расчет расходов на электроэнергию для силовых электродвигателей $\mathcal{E}_э$, тыс. руб., может быть произведен по формуле

$$\mathcal{E}_э = q_э \cdot S_э \cdot l_{\text{факт}} \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где $q_э$ — расход электроэнергии на один км ($q_э = 0,19$ кВт/км); $S_э$ — стоимость 1 кВт·ч силовой электроэнергии, руб.; $l_{\text{факт}}$ — фактическое среднее расстояние, пройденное подъёмно-транспортным оборудованием в течение года $l_{\text{факт}} = Q_r \cdot 0,5 \cdot (l_{\text{max}} - l_{\text{min}})$; 10^{-3} — пересчёт м в км;

Выводы

Проектирование перевалочного склада является сложной задачей и не всегда может разрабатываться по типовому проекту. Предложенные варианты кардинального изменения зоны хранения склада имеют свои положительные и отрицательные стороны.

1. При применении V-образного расположения проходов снижение полезной ёмкости склада достигает 2 – 5 % в зависимости от габаритов перевалочного склада. При выборе ёлочного типа

размещения стеллажей, полезная вместимость при том же внутреннем объеме склада сокращается на 4 – 9 %.

2. Процент сокращения пробега погрузчика при *V*-образной схеме размещения проходов между стеллажами достигает 10 – 12 %, а ёлочный тип размещения стеллажей приносит до 18 % сокращения пробега погрузчика по складу.

3. По произведенным технико-экономическим расчётам для перевалочного склада со сроком хранения 2 – 5 дней новые типы конструкции обеспечивают эффективную перегрузку в цепи поставок. Для складов промышленных или торговых предприятий со сроком хранения от 10 до 15 суток, где основной доход приносит аренда склада для хранения грузов, новые конструкции убыточны.

В дальнейших исследованиях в этом направлении необходимо проанализировать работу перевалочного склада при совмещении нескольких операций (размещение груза в стеллажах по прибытию и извлечение со стеллажей для дальнейшего отправления).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушкарева Л. В. Анализ и прогноз грузовых перевозок морским транспортом России / Л. В. Пушкарева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6. — С. 173–178.
2. Абрамова В. Н. Состояние и перспективы развития морского и внутреннего водного транспорта России / В. Н. Абрамова, М. В. Ботнарюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1. — С. 114–120.
3. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок: монография / О. Б. Маликов. — М.: ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014.
4. Маликов О. Б. О комплексном проектировании складов / О. Б. Маликов // Логистика. — 2014. — № 2. — С. 20–22.
5. Коровяковский Е. К. Моделирование работы склада в цепи поставок / Е. К. Коровяковский, Ю. Н. Панова // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте: тр. XV междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, студентов и аспирантов. — СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. — С. 417–428.
6. Коровяковская Ю. В. Складские комплексы как элементы логистической цепи / Ю. В. Коровяковская, О. Б. Маликов // Вестник инженеров-электромехаников железнодорожного транспорта. — 2003. — № 1. — С. 222–224.
7. Толмачев К. С. Повышение эффективности автоматизированной сортировки на складе / К. С. Толмачев // Логистика. — 2014. — № 8. — С. 30–34.
8. Пилипчук С. Ф. О проектировании склада штучных грузов / С. Ф. Пилипчук, А. Е. Радаев // Логистика и управление цепями поставок. — 2010. — № 4. — С. 21–33.
9. Пилипчук С. Ф. Определение потребной вместимости склада / С. Ф. Пилипчук, А. Е. Радаев // Логистика и управление цепями поставок. — 2012. — № 5. — С. 19–25.
10. Илесалиев Д. И. Использование различных схем расположения проходов склада тарно-штучных грузов / Д. И. Илесалиев // Логистика: современные тенденции развития. — 2015. — № 1. — С. 174–176.

THE IMPACT OF AISLES DISPOSAL IN THE STORAGE AREA ON WATER TRANSPORT WAREHOUSE'S PARAMETERS

There are several important functions produced in the warehouses, located in terminals connecting water and other modes of transport. Location schemes of racks and aisles between them in storage area has a great importance in the operation of warehouse. Many scientific publications are related to the questions of optimal storing of cargoes, but non-standard schemes of aisles location in scientific literature are shown rarely. Due to this the topic of this article is relevant. Ordinary racks and aisles are disposed athwart, in the article different variants of disposal with "euclidian advantage" are proposed. Such a variant of aisles disposal has positive and negative sides and has the limited shere of operation. With using of non-standard aisles disposal system capacity of the warehouse is reduced. But loader race is also declining from loading-unloading area to storage area. The aim

of this article is to find optimal correlation between capacity and loader race. Loader race reduced upto 18% and capacity of the warehouse is also declining upto 9% with using schemes propoced in the article. Calculations of such an warehouse were conducted in scientific literature in the first time.

Keywords: warehouse, storage area, the parameters of the warehouse, capacity, loader race.

REFERENCES

1. Pushkareva, Lyudmila Vasilevna. "The analysis and the forecast of freight transportation by sea transport Russia." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6 (2014): 173–178.
2. Abramova, Valentina Nikolaevna. "State and prospects of development of sea and inland water transport of Russia." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1 (2014): 114–120.
3. Malikov, Oleg Borisovich. *Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepyakh postavok: monografiya*. M.: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2014.
4. Malikov, Oleg Borisovich. "O kompleksnom proektirovanii skladov." *Logistika* 2 (2014): 20–22.
5. Korovyakovskiy, Evgeniy Konstantinovich, and Yu. N. Panova. "Modelirovanie raboty sklada v tsepi postavok" *Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya v promyshlennosti i na transporte: trudy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchjonyh, studentov i aspirantov*. SPb: Peterburgskij gos. un-t putej soobshheniya, 2013: 416–427.
6. Korovyakovskaya, Yuliya Vladimirovna, and O. B. Malikov. "Skladskie komplekсы как элементы logisticheskoy tsepi." *Vestnik inzhenerov-elektromekhanikov zheleznodorozhnogo transporta* 1 (2003): 222–224.
7. Tolmachev, Kirill Sergeevich. "Povyshenie effektivnosti avtomatizirovannoy sortirovki na sklade." *Logistika* 8 (2014): 30–34.
8. Pilipchuk, Sergey Fedorovich, and A. E. Radaev. "O proektirovanii sklada shtuchnykh грузов." *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* 4 (2010): 21–33.
9. Pilipchuk Sergey Fedorovich, and A. E. Radaev. "Opredelenie potrebnoy vmestimosti sklada." *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* 5 (2012): 19–25.
10. Ilesaliev, Daurenbeik Ikhtiyarovich. "Ispol'zovanie razlichnykh skhem raspolozheniya prokhodov sklada tarno-shtuchnykh грузов." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya* 1 (2015): 174–176.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Илесалиев Дауренбек Ихтиярович —
аспирант.
ФГБОУ ВПО ПГУПС
ilesaliev@mail.ru
Коровяковский Евгений Константинович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО ПГУПС
ekorsky@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilesaliev Daurenbeik Ikhtiyarovich —
postgraduate.
Petersburg State Transport University
ilesaliev@mail.ru
Korovyakovskiy Evgeniy Konstantinovich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Petersburg State Transport University
ekorsky@mail.ru

УДК 656.1

С. С. Павленко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОРСКИХ И ТЫЛОВЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Статья посвящена вопросам технологического взаимодействия морских и тыловых контейнерных терминалов в рамках планирования работы наземных сетей грузораспределения. Основной задачей исследования получение необходимых сведений об уровне технологического взаимодействия морского и ты-

лового контейнерных терминалов в двухзвенной системе и параметрах складов терминалов, а также выработка механизма образования объема груза на складе морского и тылового контейнерного терминала. С помощью аналитических методов в работе выведены формулы объема грузов на складах морского и тылового терминалов, а также предложена формула для вычисления максимальной емкости складов терминалов в экспортно-импортном сообщении. Использованы методы математического моделирования, с помощью которых построена имитационная модель двухзвенной системы: морской терминал – тыловой терминал, позволяющая оценить влияние неравномерности поступления транспортных средств на величину необходимого объема складов морского и тылового терминалов. В работе также получены данные о требуемом уровне технологического взаимодействия между терминалами. Результаты исследования могут быть использованы для планирования работы морского транспорта и инфраструктурных объектов морского порта.

Ключевые слова: контейнеры, морские порты, тыловые терминалы, планирование, имитационное моделирование, сети грузораспределения.

Введение

В последнее время вопросам технологического взаимодействия морских портов и тыловых терминалов уделяется активное внимание, количество научных трудов по этой тематике непрерывно растет. Однако несмотря на то, что некоторые базовые формулы и методики подвергаются многочисленным изменениям, задача оптимизации технологического взаимодействия и ёмкости складов в двухзвенной системе *морской порт — сухой порт* остается нерешенной [1]. В связи с этим нахождение решения и разработка соответствующих рекомендаций в общем виде с учетом возрастающей конкуренции между объектами транспортной инфраструктуры является актуальной задачей.

Морские и тыловые контейнерные терминалы объединяет сходная функциональная структура и назначение (передача груза между видами транспорта, согласование грузопотоков, коммерческое хранение, логистическая доработка). Тем не менее, каждый из видов терминалов имеет приоритетный функциональный профиль, определяющий особенности их структуры.

Общая постановка задачи

Рассмотрим морской контейнерный терминал как простейший функциональный элемент, служащий для стыковки входных и выходных потоков через него (рис. 1).

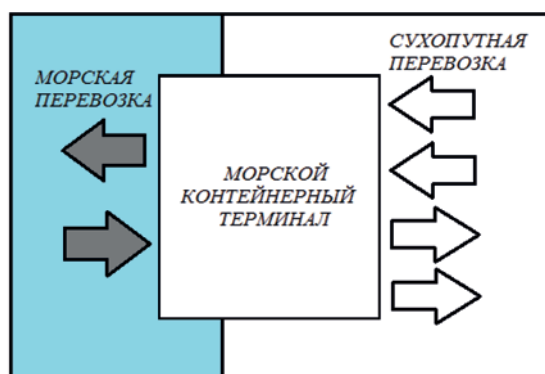


Рис. 1. Контейнерный терминал как логистический элемент

Экспортный грузопоток $Q^{\text{эксп}}$, поступающий в порт сухопутным транспортом и обрабатываемый на наземном грузовом фронте порта (далее — НГФ), обозначим как $Q_{\text{НГФ}}(t)$, а убывающий из него морем и обрабатываемый на морском грузовом фронте порта (далее — МГФ) как $Q_{\text{МГФ}}(t)$. Значение объема хранимого на складе терминала груза в момент времени получается интегрированным выражением:

$$E_{\text{скл}}(t) = \int_0^t [Q_{\text{нгф}}(t) - Q_{\text{мгф}}(t)] dt + E_0, \quad (1)$$

где E_0 — произвольная константа, определяемая как начальный запас груза на складе.

Характер подобной зависимости приведен на рис. 2 и 3.

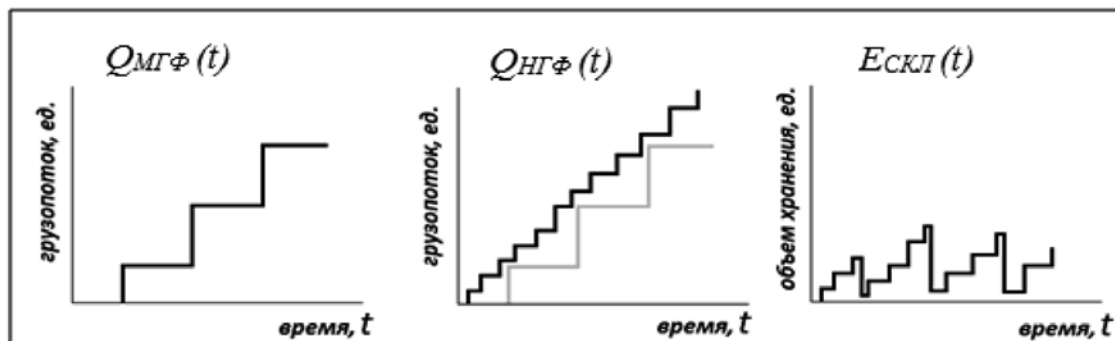


Рис. 2. Образование объема хранения груза на складе терминала

Завоз груза в порт обычно осуществляется как автомобильным транспортом (малыми грузовыми партиями), так и по железной дороге (средними партиями), а вывоз грузов — крупными судовыми партиями. Все вместе это приводит к характерным изменениям объемов складирования. Неравномерность завоза и вывоза приводит к избытку или дефициту груза на складе морского терминала. В связи с этим в порту требуется хранить груз в объеме, превышающем размер одной судовой партии. Т. е. на складе-терминале необходимо иметь возможность хранить избыточный запас, возникающий при задержке вывоза вследствие неприбытия транспортного средства (судна), а также накапливать «страховочный» запас, предназначенный для загрузки прибывшего ранее срока судна. Наконец, при годовом грузопотоке Q необходимость хранения груза на терминале в течение некоторого периода времени $T_{\text{хр}}$ (по требованиям госорганов или по поручению клиента) приводит к тому, что на складе образуется дополнительный постоянный запас E_0 .

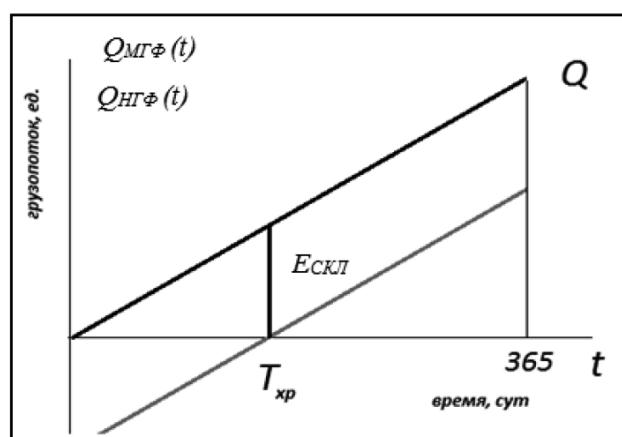


Рис. 3. Оценка объема хранения на складе порта

Объем груза на складе, обусловленный хранением $T_{\text{хр}}$, равен расстоянию по вертикали между средними линиями завоза и вывоза:

$$E_0 = \frac{T_{\text{хр}} \cdot Q_{\text{год}}}{365}. \quad (2)$$

Объединив выражения (1) и (2), можно получить выражение объема груза на складе:

$$E_{\text{скл}}(t) = \int_0^t [Q_{\text{НГФ}}(t) - Q_{\text{МГФ}}(t)] dt + \frac{T_{\text{хр}} Q_{\text{год}}}{365}. \quad (3)$$

Введение в цепь перевозки еще одного элемента — *сухой порт* — позволяет рационально распределить между морским и тыловым терминалами функции хранения избыточного запаса, возникающего при задержке вывоза вследствие неприбытия транспортного средства (судна), а также накопления страховочного запаса, предназначенного для загрузки прибывшего ранее срока судна [2].

В системе взаимодействия *морской порт* — *сухой порт*, кроме входящего в систему (непосредственно в сухой порт) сухопутного грузопотока $Q_{\text{НГФ}}(t)$ и исходящего морского грузопотока $Q_{\text{МГФ}}(t)$ появляется грузопоток из сухого порта в морской порт — $Q_{\text{СП}}(t)$. Двухзвенная система позволяет минимизировать требования, предъявляемые к объему склада в наиболее дефицитных прибрежных зонах за счет переноса коммерческого хранения в тыловые территории, а также предоставляет возможность частичной передачи в сухой порт функции буфера неравномерностей завоза и вывоза груза. Двухзвенная система позволяет разделить эти функции между морским и тыловым терминалами, оставив за первым исключительно функции обработки морских судов. Общая схема взаимодействия элементов двухзвенной системы приведена на рис. 4.

Поток из морского терминала в сухой порт может находиться в полном управлении оператора терминала (если для его реализации используются подъездные пути) или иметь те или иные внешние ограничения на вместимость транспортных средств и расписание их движения (если используются пути общего пользования оператора железнодорожных перевозок). Все три потока характеризуются соотношением непрерывности грузопотока:

$$\int_0^{365} Q_{\text{МГФ}} dt = \int_0^{365} Q_{\text{НГФ}} dt = \int_0^{365} Q_{\text{СП}} dt. \quad (4)$$

Различие размеров и несогласованность расписаний поступления грузовых партий на входе и на выходе элементов меняют характер своего действия на размеры склада. Если при экспортных отправлениях вывоз с морского терминала в двухзвенной системе остается неизменным, то ввоз экспортного груза на морской терминал теперь уже осуществляется промежуточным грузопотоком $Q_{\text{СП}}(t)$. Грузопоток на входе наземного терминала $Q_{\text{НГФ}}(t)$ остается неизменным, а вывоз из него характеризуется промежуточным потоком $Q_{\text{СП}}(t)$. Таким образом, абсолютное значение объема груза на складе морского порта определяется выражением

$$E_{\text{мор.скл}}(t) = \int_0^t [Q_{\text{СП}}(t) - Q_{\text{МГФ}}(t)] dt + \frac{T_{\text{хр}} Q_{\text{год}}}{365}, \quad (5)$$

тогда как объем значения объема груза на складе сухого порта можно представить в виде

$$E_{\text{наз.скл}}(t) = \int_0^t [Q_{\text{НГФ}}(t) - Q_{\text{СП}}(t)] dt + \frac{T_{\text{хр}} Q_{\text{год}}}{365}. \quad (6)$$

Если промежуточный поток $Q_{\text{СП}}$ находится под управлением оператора терминала и не имеет ограничений по размерам и частоте подач, то за счет его изменения можно решить любую задачу — от полного устранения хранения на морском терминале до полного исключения хранения на тыловом терминале. В целях разработки рекомендаций по формированию внутреннего грузопотока и распределению функций между звеньями транспортной цепи необходимо соблюдение следующих условий:

- уменьшение необходимой для организации хранения площади на наиболее дорогостоящей территории (снижение капитальных затрат);
- уменьшение парка и равномерное распределение интенсивности работы требуемого перегрузочного оборудования на морском терминале;
- возможность адекватной реакции на изменения размеров требуемых партий.



Рис. 4. Общая схема взаимодействия морского и тылового контейнерных терминалов

В связи с тем, что стоимость складирования груза на контейнерном терминале зависит от удельных расходов собственника терминала на содержание инфраструктуры, целесообразно далее перейти к определению емкости склада морского терминала $E_{\text{мор.скл}}$ и склада «сухого порта» $E_{\text{наз.скл}}$.

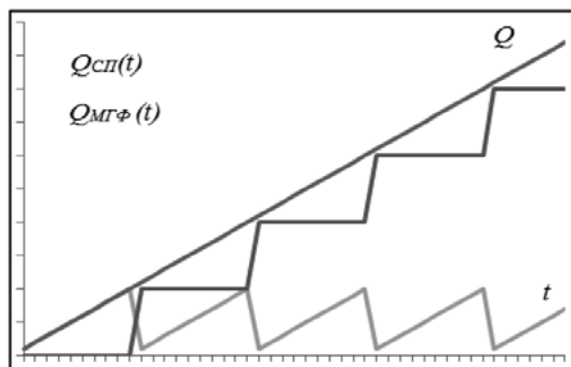


Рис. 5. Динамическая составляющая объема склада морского порта

Проанализировав приведенную на рис. 5 кривую динамической составляющей объема склада морского порта для экспортного грузопотока, можно увидеть, что при регулярном завозе и вывозе максимальные значения объема груза на складе не превышают объем судовой партии V . Следовательно, максимальную оценку вместимости морского контейнерного терминала дает следующее выражение:

$$E \leq V + \frac{Q_{\text{год}} T_{\text{хр}}}{365} = V + \frac{NVT_{\text{хр}}}{NT_{\text{суд}}} = V \left(\frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{суд}}} + 1 \right). \quad (7)$$

При этом полная передача функции коммерческого хранения в сухой порт, т. е. $T_{\text{хр}} = 0$, позволит уменьшить максимальную вместимость морского контейнерного терминала и даст следующее выражение:

$$E \leq V + \frac{Q_{\text{год}} \cdot T_{\text{хр}}}{365} = V. \quad (8)$$

Для тылового контейнерного терминала ситуация будет схожей. При завозе железнодорожным транспортом входящий грузопоток $Q_{\text{нгф}}(t)$ на терминал будет характеризоваться объемом груза, доставляемым ускоренными контейнерными поездами (далее — УКП) — $V_{\text{укп}}$, тогда как вывоз груза со склада сухого порта будет характеризоваться объемом груза, вывозимым блок-трэйнами $V_{\text{бт}}$.

Значение $V_{\text{укп}} > V_{\text{бт}}$, так как УКП является магистральной линией в рассматриваемой сети, тогда как блок-трэйны выполняют роль фидеров. Построим кривую динамической составляющей объема контейнерного склада сухого порта (рис. 6).

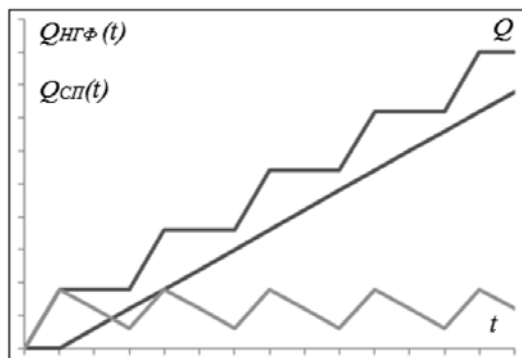


Рис. 6. Динамическая составляющая объема склада тылового терминала

Проанализировав приведенную кривую динамической составляющей объема склада сухого порта, можно увидеть, что при регулярном вывозе максимальные значения объема груза на складе не превышают объем партии УКП — $V_{\text{УКП}}$. Следовательно, максимальная вместимость тылового контейнерного терминала для обработки грузопотока дает следующее выражение:

$$E \leq V_{\text{УКП}} + \frac{Q_{\text{год}} T_{\text{хр}}}{365} = V_{\text{УКП}} + \frac{NV_{\text{УКП}} T_{\text{хр}}}{NT_{\text{УКП}}} = V_{\text{УКП}} \left(\frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{УКП}}} + 1 \right). \quad (9)$$

Полная передача функции коммерческого хранения в «сухой порт» из морского порта, т. е. $T_{\text{хр}} > 0$, также потребует от склада возможности хранить и судовую партию V . Тогда

$$E \leq V_{\text{УКП}} + \frac{NV_{\text{УКП}} T_{\text{хр}}}{NT_{\text{УКП}}} + V = V + V_{\text{УКП}} \left(\frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{УКП}}} + 1 \right). \quad (10)$$

Далее предлагается рассмотреть случай одновременного поступления в двухзвенную систему экспортного $Q^{\text{эксп}}$ и импортного $Q^{\text{имп}}$ грузопотоков. Данные грузопотоки можно условно разделить на увеличивающие груз на складах (завоз экспортного груза через НГФ сухого порта, завоз экспортного груза из сухого порта на склад морского порта, прием импортного груза через МГФ морского порта, приём импортного груза из морского порта в сухой порт) и на уменьшающие груз на складах (вывоз экспортного груза через МГФ морского порта, вывоз экспортного груза из сухого порта на склад морского порта, вывоз импортного груза из морского порта на склад сухого порта, вывоз импортного груза через НГФ сухого порта). В общем виде их можно записать в виде:

- для морского склада: $q_{\text{СП}}^{\text{эксп}} - q_{\text{МГФ}}^{\text{эксп}} + q_{\text{МГФ}}^{\text{имп}} - q_{\text{СП}}^{\text{имп}}$,
- для склада сухого порта: $q_{\text{НГФ}}^{\text{эксп}} - q_{\text{СП}}^{\text{эксп}} + q_{\text{СП}}^{\text{имп}} - q_{\text{НГФ}}^{\text{имп}}$.

Рассуждения, аналогичные приведенным ранее, позволяют аналитически вывести значение базовой вместимости склада для экспортного и импортного направлений в отношении контейнерных складов морского и тылового терминалов:

$$E_{\text{мор.скл}}(t) = \int_0^t [q_{\text{СП}}^{\text{эксп}}(t) - q_{\text{МГФ}}^{\text{эксп}}(t) + q_{\text{МГФ}}^{\text{имп}}(t) - q_{\text{СП}}^{\text{имп}}(t)] dt + \frac{T_{\text{хр}} Q_{\text{год}}}{365}; \quad (11)$$

$$E_{\text{тыл.скл}}(t) = \int_0^t [q_{\text{НГФ}}^{\text{эксп}}(t) - q_{\text{СП}}^{\text{эксп}}(t) + q_{\text{СП}}^{\text{имп}}(t) - q_{\text{НГФ}}^{\text{имп}}(t)] dt + \frac{T_{\text{хр}} Q_{\text{год}}}{365}. \quad (12)$$

Для получения необходимых данных для определения характеристик склада морского терминала $E_{\text{мор.скл}}$ и тылового терминала $E_{\text{тыл.скл}}$ при одновременном поступлении в двухзвенную систему экспортного и импортного грузопотоков предлагается использовать имитационное моделирование [3] – [9].

Описание предполагаемой модели

Пусть имеются две независимые транспортные системы: однозвенная, состоящая из морского порта, и двухзвенная, состоящая из морского порта и сухого порта. Также пусть имеется заданный экспортный грузопоток $Q^{\text{эксп}}$ и импортный грузопоток $Q^{\text{имп}}$, реализуемые поступлением в систему судов с интервалом $T_{\text{суд}}$ и УКП с интервалом $T_{\text{УКП}}$.

УКП характеризуются объемом груза — $V_{\text{УКП}}$, морские суда характеризуются объемом груза V , блок-трэйны, работающие на линии между портом и «сухим портом» характеризуются объемом груза $V_{\text{БТ}}$. МГФ характеризуется производительностью $P_{\text{МГФ}}$, TEU/сут, тогда как НГФ характеризуется производительностью $P_{\text{НГФ}}$, УКП/сут. Производительность погрузочного фронта для технического грузопотока морским и тыловым терминалами характеризуется производительностью $P_{\text{СП}}$, БТ/сут.

Формальное описание логики модели

Вначале рассмотрим двухзвенную транспортную систему, состоящую из морского порта и «сухого порта»:

Шаг 0. Груз на складах морского и тылового контейнерных терминалов отсутствует. Временной интервал в модели принят равным 1 сут.

Шаг 1. Железнодорожным транспортом (УКП) экспортный груз поступает на тыловой контейнерный терминал через НГФ и находится на нем в течение срока хранения $T_{\text{хр}}$.

Шаг 2. В случае запланированного в ближайшие 10 суток подхода судна груз с помощью системы блок-трэйнов доставляется партиями размером $V_{\text{БТ}}$ на контейнерный склад морского терминала, где выгружается на склад в случае отсутствия судна у причала в ожидании прихода судна. Если судно стоит у причала и готово принимать экспортный груз, то груз перегружается на судно по прямому варианту.

Шаг 3. Приход судна происходит в интервале $T_{\text{суд}}$. После прихода судна с его борта через МГФ полностью выгружается импортный груз, который помещается на контейнерный склад морского терминала.

Шаг 4. После окончания выгрузки импортного груза в объеме V на МГФ начинается погрузка экспортного груза на судно (причем размер партии экспортного груза может быть как меньше, так и больше размеров импортной, но не более максимальной вместимости судна) для отправки грузополучателям морем.

Шаг 5. После окончания выгрузки первой же партии импортного груза, больше или равной $V_{\text{БТ}}$, данная партия погружается в блок-трэйны и в эти же сутки отправляется на склад «сухого порта».

Шаг 6. Железнодорожным транспортом импортный груз поступает на контейнерный склад тылового терминала через и находится там в течение некоего срока хранения $T_{\text{хр}}$.

Шаг 7. После того как объем груза на складе «сухого порта» будет больше или равен $V_{\text{УКП}}$, то партия импортного груза $V_{\text{УКП}}$ грузится в УКП и отправляется грузополучателям.

Шаг 8. Модель состоит из серии в 365 интервалов, каждый из которых равен одним суткам. Далее рассмотрим однозвенную транспортную систему:

Шаг 0. Груз на складе морского порта отсутствует. Временной интервал в модели также принят равным 1 суткам.

Шаг 1. Железнодорожным транспортом (УКП) экспортный груз поступает на контейнерный склад морского через НГФ и находится там в течение некоего срока хранения $T_{\text{хр}}$.

Шаг 2. Приход судна происходит в интервале $T_{\text{суд}}$. После прихода судна с его борта через МГФ полностью выгружается импортный груз, который помещается на контейнерный склад морского терминала.

Шаг 4. После окончания выгрузки импортного груза в объеме V на МГФ начинается погрузка экспортного груза на судно (причем размер партии экспортного груза может быть как меньше, так и больше размеров импортной, но не более максимальной вместимости судна) для отправки грузополучателям морем.

Шаг 5. После окончания выгрузки первой же партии импортного груза, больше или равной $V_{\text{УКП}}$, партия импортного груза $V_{\text{УКП}}$ грузится в УКП и отправляется грузополучателям.

Шаг 8. Модель состоит из серии в 365 интервалов, каждый из которых равен 1 сут.

Полученная модель позволяет провести исследование основных параметров технологического взаимодействия морского и тылового контейнерных терминалов в однозвенной и двухзвенной системах. С помощью модели можно получить данные о динамике ввоза/вывоза импортного и экспортного грузов на склады, максимальном и минимальном объеме груза на складах в каждый момент времени.

Далее проведем несколько экспериментов с моделью.

Эксперимент 1. Пусть экспортный грузопоток $Q^{\text{экс}}$ составит 30000 TEU/год, импортный грузопоток $Q^{\text{имп}}$ составит 45000 TEU/год. Потоки реализуются равномерным поступлением в систему морских судов с интервалом 10 сут и УКП с интервалом 3 сут. Срок хранения груза составит 7 сут.

Полученные результаты моделирования приведены на рис. 7 – 9:

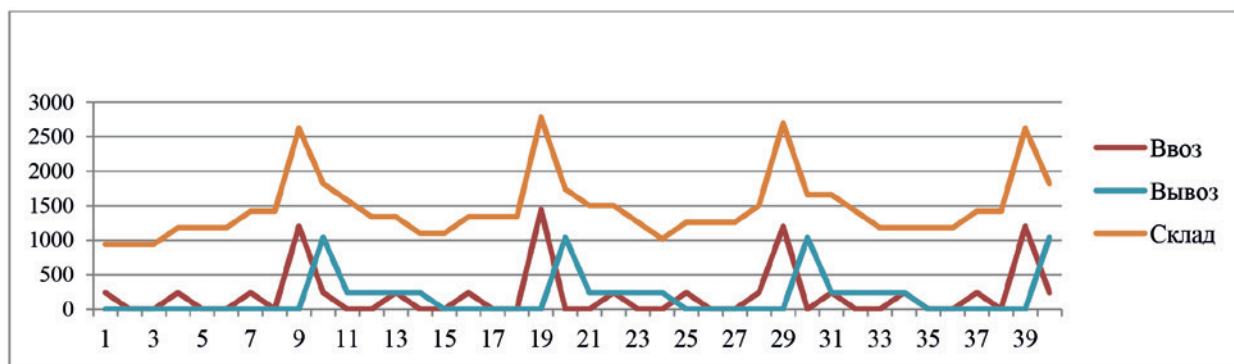


Рис. 7. Динамика изменения объема груза на складе морского порта в однозвенной системе

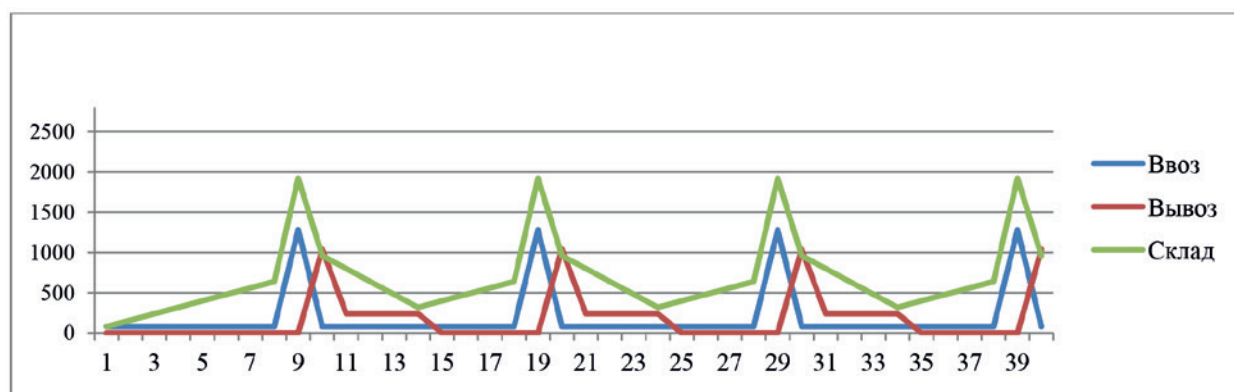


Рис. 8. Динамика изменения объема груза на складе морского порта в двухзвенной системе

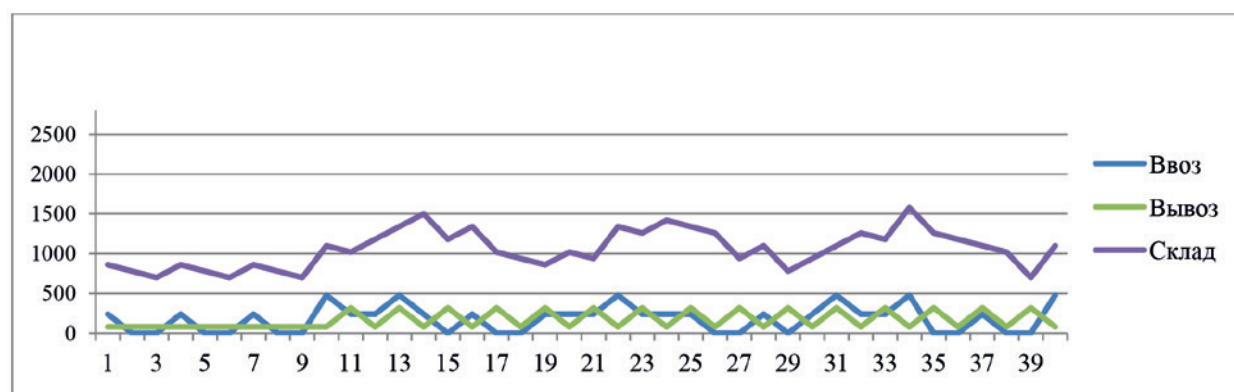


Рис. 9. Динамика изменения объема груза на складе «сухого порта» в двухзвенной системе

Анализ результатов первого эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

1. Системы успешно справляются с поступлением экспортного и импортного груза. При этом системы обслуживают 38 судозаходов и 122 поступления УКП. Работа в двухзвенной системе осуществляется посредством ежедневной работы от одного до трех блок-трейнов.

2. В однозвенной системе при заданных исходных данных среднее количество контейнеров на складе морского терминала составляет 1489 TEU, тогда как в двухзвенной системе — 710 TEU (при этом среднее количество контейнеров на складе тылового терминала составляет 1129 TEU).

3. В однозвенной системе при заданных исходных данных максимальное количество контейнеров на складе морского терминала составляет 2700 TEU ($> 2V$), тогда как в двухзвенной системе — 1920 TEU ($< 2V$), что на 28 % меньше.

Эксперимент 2. Пусть экспортный грузопоток $Q^{\text{эсп}}$ также составит 30000 TEU/год, импортный грузопоток $Q^{\text{имп}}$ составит 45000 TEU/год. Однако поступление в систему морских судов будет неравномерным — с произвольным интервалом 5 – 15 сут, тогда как УКП будут поступать равномерно с интервалом, равным трое суток. Срок хранения груза также составит 7 сут.

Полученные результаты моделирования приведены на рис. 10 – 12.

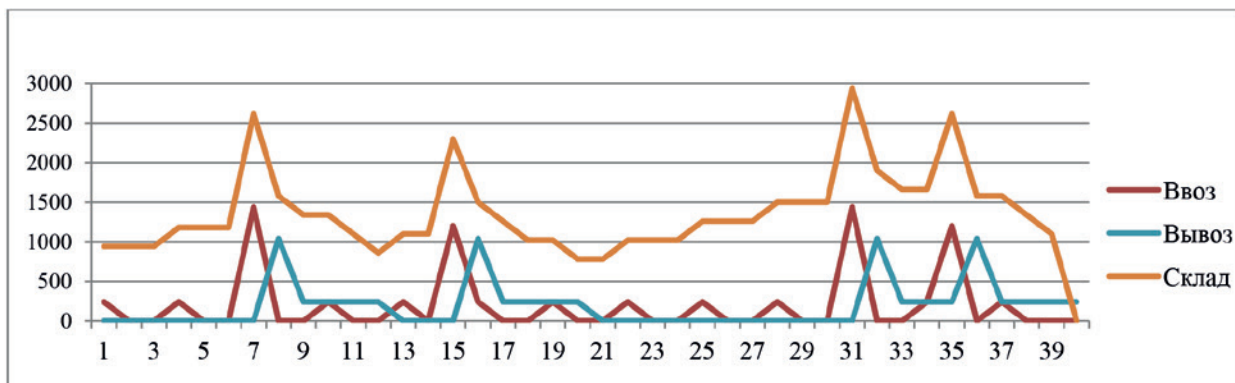


Рис. 10. Динамика изменения объема груза на складе морского порта в однозвенной системе

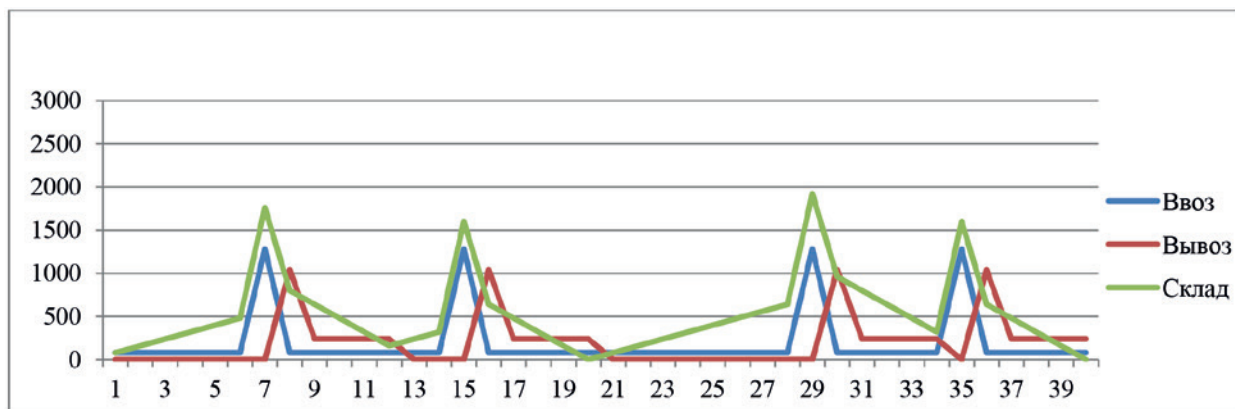


Рис. 11. Динамика изменения объема груза на складе морского порта в двухзвенной системе

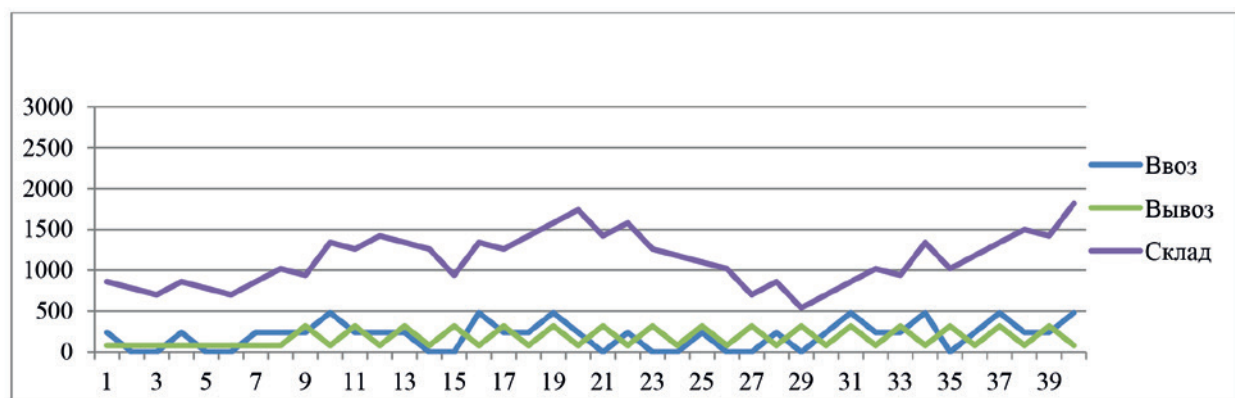


Рис. 12. Динамика изменения объема груза на складе сухого порта в двухзвенной системе

Анализ результатов второго эксперимента позволяет сделать следующие выводы.

1. Системы успешно справляются с поступлением экспортного и импортного груза, при этом системы обслуживают 38 судозаходов и 122 поступления УКП. Работа в двухзвенной системе осуществляется посредством ежедневной работы от двух до трех блок-трейнов.

2. В однозвенной системе при заданных исходных данных среднее количество контейнеров на складе морского терминала составляет — 1344 TEU, тогда как в двухзвенной системе — 507 TEU (при этом среднее количество контейнеров на складе тылового терминала составляет — 1102 TEU).

3. В однозвенной системе при заданных исходных данных максимальное количество контейнеров на складе морского терминала составляет — 2940 TEU ($> 2V$), тогда как в двухзвенной системе значение не изменилось — 1920 TEU ($< 2V$), что на 35 % меньше.

Проведенные эксперименты и имитационное моделирование позволяет оценить максимальную требуемую вместимость склада морского и тылового контейнерных терминалов при обработке экспортного и импортного контейнеропотоков. При полной передаче функции коммерческого хранения в тыловой терминал (т. е. для морского склада $T_{\text{хр}} = 0$) максимальная необходимая вместимость морского контейнерного терминала и даст следующее выражение:

$$E \leq 2(V + \frac{Q_{\text{год}} T_{\text{хр}}}{365}) = 2V. \quad (13)$$

Полная передача функции коммерческого хранения в «сухой порт» из морского порта (т.е. для тылового терминала $T_{\text{хр}} > 0$) потребует от склада возможности хранить как судовую партию V , так и сглаживать колебания, возникающие при неравномерном подходе морских судов $\Delta T_{\text{суд}}$. Таким образом, максимальная емкость склада тылового контейнерного терминала будет выражаться в виде

$$E \leq 2(V_{\text{УКП}} + \frac{NV_{\text{УКП}} T_{\text{хр}}}{NT_{\text{УКП}}}) + V + V_{\text{БТ}} \Delta T_{\text{суд}} = 2(V + V_{\text{УКП}} \left(\frac{T_{\text{хр}}}{T_{\text{УКП}}} + 1 \right) + V_{\text{БТ}} \Delta T_{\text{суд}}). \quad (14)$$

Проведенные эксперименты показывают, что введение в цепь транспортировки дополнительного звена — тылового контейнерного терминала — приводит к увеличению суммарного размера складов — $E_{\text{мор.скл}} + E_{\text{тыл.скл}}$ по сравнению со складом однозвенной системы $E_{\text{скл}}$, т. е. $E_{\text{мор.скл}} + E_{\text{тыл.скл}} > E_{\text{скл}}$. Основная причина — необходимость компенсировать две пары неравномерностей размеров партий и поступления транспортных средств.

Однако размер непосредственно склада морского терминала $E_{\text{мор.скл}}$ в двухзвенной системе оказывается на 35 % меньше склада однозвенной системы $E_{\text{скл}}$, т. е. $E_{\text{мор.скл}} < E_{\text{скл}}$, и поскольку стоимость земли и требования к системе складирования в границах порта обычно выше по сравнению с территорией, находящейся вне границ порта и даже города, то удельная стоимость хранения груза на этих складах также будет различаться. Можно выразить стоимость складирования для однозвенной системы как $C_1 = c_{\text{м}} E_{\text{скл}}$ и двухзвенной системы $C_2 = c_{\text{м}} E_{\text{мор.скл}} + c_{\text{л}} E_{\text{тыл.скл}}$ (где $c_{\text{м}}$ — удельная стоимость хранения на морском складе как, а $c_{\text{л}}$ — на складе тылового терминала). Если $C_1 > C_2$, то вариант использования в транспортной цепи двухзвенной системы: морского и тылового контейнерного терминала, является более предпочтительным [10].

Выводы

1. Функционирование логистического элемента — морского контейнерного терминала — в однозвенной системе приводит к появлению избытков или дефицита грузов на складе. В связи с этим в порту необходимо наличие возможности хранения избыточного запаса, возникающего при задержке вывоза вследствие неприбытия транспортного средства (судна), а также накопления «страховочного» запаса, предназначенного для загрузки судна, прибывшего ранее срока.

2. В случае организации функционирования двухзвенной транспортной цепочки морской терминал — тыловой терминал, оператор морского терминала получает возможность уменьшить площади для хранения на дорогостоящей портовой территории, уменьшить парк и равномерно распределить работу перегрузочного оборудования на терминале, а также получает возможность адекватно реагировать на изменения размеров и частоты подач требуемых партий.

3. В случае управления технологическими каналами взаимодействия оператор морского терминала получает возможность решать любую задачу, вплоть до полного устранения хранения на морском терминале.

4. Использование аналитических методов позволяет вывести значения базовой вместимости складов морского и тылового терминалов для экспортного и импортного направлений.

5. Имитационное моделирование позволяет оценить влияние неравномерности поступления транспортных средств на величину необходимого объема складов морского и тылового терминалов, а также получить данные о требуемом уровне технологического взаимодействия между терминалами, что в итоге может быть использовано для планирования работы транспорта и инфраструктурных объектов.

6. В случае, когда удельная стоимость хранения на морском складе значительно выше таковой на тыловом складе, то вариант использования в транспортной цепи двухзвенной системы: морского и тылового контейнерного терминала, является более предпочтительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Обоснование концепции «сухого порта» / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Транспортное дело России. — 2013. — № 4. — С. 77–80.
2. Кузнецов А. Л. Методология технологического проектирования современных контейнерных терминалов. — СПб.: Феникс, 2008. — 132 с.
3. Китиков А. Н. Расчет морского фронта методами имитационного моделирования / А. Н. Китиков, А. Л. Кузнецов, И. А. Русинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 2 (72). — С. 3–6.
4. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости портового склада с учетом неравномерности работы смежного транспорта / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 3–9.
5. Crainic T. G. Modeling dry-port-based freight distribution planning / T. G. Crainic, P. Dell’Olmo, N. Ricciardi, A. Sgalambro // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2015. — № 55. — Pp. 518–534. DOI:10.1016/j.trc.2015.03.026.
6. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование работы порта с учетом дифференцированных метеоусловий / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 3–8.
7. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование в задачах проектирования и эксплуатации автомобильных терминалов / А. Л. Кузнецов, С. В. Бобрышев, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2 (64). — С. 8–13.
8. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.
9. Schruben L. Simulation modeling with event graphs / L. Schruben // Communications of the ACM. — 1983. — Vol. 26. — № 11. — Pp. 957–963.
10. Бобрышев С. В. Методика решения общей задачи оптимизации технико-экономических параметров грузового терминала с помощью имитационного моделирования / С. В. Бобрышев, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 2 (72). — С. 6–8.

SEA PORTS AND INLAND CONTAINER TERMINALS INTERACTION MODELING

Article is devoted to the process of interaction of marine and inland container terminals in the planning of cargo distributions networks operations. Based on the definition of the functions of inland container terminal in the study, a general functional block diagram of the interaction of marine container terminals and logistics is made. Analysis of the features and functions of the rear container terminals allowed identifying the main advantages and disadvantages of a two-tier system - marine terminal - inland terminal. Formula of the volume of goods in warehouses and logistical marine terminals with the help of analytical methods is made, as well as the proposed

formula for calculating the maximum storage capacity of terminals in the export-import traffic. Simulation model of the two-tier system - marine terminal - rear terminal is also made. The simulation model allows to estimate the impact of the uneven arrival of vehicles on the value of the necessary volume of warehouses and logistic marine terminals, as well as to obtain data on the required level of technological interaction between the terminals, which could eventually be used for the planning of marine transport and infrastructure of sea ports.

Keywords: containers, sea ports, inland terminal, transport plans, simulation modeling, cargo distribution systems.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L. ., and V. N Shcherbakova-Slyusarenko. "Justification of «dry port» concept." *Transport business of Russia* 4 (2013): 77–80.
2. Kuznetsov, A. L. *Metodologia technologicheskogo proektirovaniya sovremennih containernih terminalov*. SPb.: Feniks, 2008.
3. Kitikov, A. N., A. L. Kuznetsov, and I. A. Rusinov. "Simulation techniques for the assessment of sea port front." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2(72) (2013): 3–6.
4. Kuznetsov, A. L., V. A. Pogodin, and Y. B. Spasskiy. "Storage capacity calculation taking into account the irregularity of land transport operations." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 3–9.
5. Crainic, Teodor Gabriel, Paolo Dell'Olmo, Nicoletta Ricciardi, and Antonino Sgalambro. "Modeling dry-port-based freight distribution planning." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 55 (2015): 518–534. DOI:10.1016/j.trc.2015.03.026.
6. Kuznetsov, A. L., V. A. Pogodin, and Y. B. Spasskiy. "The simulation modeling of the port operations subject to differentiated weather conditions." *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (2011): 3–8.
7. Kuznetsov, A. L., S. V. Bobryshev, and Y. B. Spasskiy. "Discrete events simulation in the tasks of development and operations of the car terminals." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2011): 8–13.
8. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 3–7.
9. Schruben, Lee. "Simulation Modeling with Event Graphs." *Communications of the ACM* 26.11: 957–963.
10. Bobryshev, S. V., and V. N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Imitation as a tool for general optimization of technical and economic parameters of cargo handling terminals." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2(72) (2013): 6–8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павленко Сергей Сергеевич —
аспирант.
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spavlenko90@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavlenko Sergei Sergeyevich —
Postgraduate.
Supervisor:
Kuznetsov Aleksandr Lvovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
spavlenko90@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 октября 2015 г.

АЛГОРИТМ УЧЕТА ОПАСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СУДНЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ

Представлена информация о типах и количестве опасных материалов на судне, необходимая для обеспечения экологической безопасности, защиты жизни и здоровья рабочих при утилизации судна. Рассмотрен вопрос о введении требования о наличии на судне Учетной записи опасных материалов (УЗОМ). Отмечается, что важной задачей является поддержание УЗОМ в актуальном состоянии путем внесения данных обо всех изменениях на судне в процессе эксплуатации. В статье рассмотрены основные этапы разработки УЗОМ для эксплуатирующихся судов. Показаны возможные пути реализации каждого этапа: предложены перечни документов и мест расположений опасных материалов, которые потребуются при определении их типа и количества; форма контрольного списка, необходимого для оценки собранной информации по опасным материалам, а также форма плана визуальной/выборочной проверки, которая используется для подтверждения наличия опасных материалов каждого пункта контрольного списка.

Ключевые слова: утилизация судов, экологическая безопасность, опасные материалы, учетная запись опасных материалов, визуальная / выборочная проверка.

В НАСТОЯЩЕЕ время для решения вопросов обеспечения защиты окружающей среды, жизни и здоровья рабочих в процессе утилизации судов международным сообществом приняты Гонконгская международная конвенция о безопасной и экологически рациональной утилизации судов (далее — Конвенция) и Правила Европейского союза по утилизации судов (далее — Правила ЕС) [1] — [3]. Данные международные документы направлены на предотвращение, сокращение и сведение к минимуму и ликвидации, в возможной степени, несчастных случаев, телесных повреждений и иного отрицательного воздействия, которое оказывает утилизация судов на здоровье человека и окружающую среду (далее — ОС), а также повышение безопасности судов, защиту здоровья человека и ОС на протяжении всего срока эксплуатации судна. Этих целей можно добиться путем предъявления требований в отношении подготовки судов к разделке и сведения к минимуму использования потенциально вредных материалов и отходов, образовавшихся в период всего срока эксплуатации судна. Дело в том, что некоторые проблемы, связанные с разделкой судов, могут быть обнаружены еще на стадии проектирования и постройки не только в отношении самих судов, но и в отношении судового оборудования. Первым шагом является выявление любых потенциально вредных материалов, которые могли быть использованы обычным образом в конструкции судов и в их оборудовании и, если это осуществимо, рассмотрение возможности использования менее вредных равноценных материалов. Вторым шагом является сведение к минимуму вредных материалов, произведенных в течение всего срока службы судна.

Согласно Конвенции и Правилам ЕС на судне должна находиться учетная запись опасных материалов (далее — УЗОМ), содержащая информацию относительно материалов, известных как опасные материалы, использованных в конструкции судна, в его оборудовании и системах. УЗОМ должна сопровождать судно в течение всего срока его эксплуатации. Владельцы судна должны отслеживать точность данных в УЗОМ и вносить в нее все изменения в конструкции и оборудовании судна, а последний владелец должен представлять этот документ вместе с судном на предприятие по утилизации [4], [5].

В Резолюции МЕРС.197(62) (далее — Резолюция) предлагается стандартный формат УЗОМ, который состоит из трех частей [6], [7]:

Часть I. Материалы, содержащиеся в конструкции судна или оборудовании.

Часть II. Отходы, образованные в процессе эксплуатации.

Часть III. Запасы.

Ч. I УЗОМ для новых судов разрабатывается на стадии проектирования и строительства при сотрудничестве с поставщиками оборудования и материалов и передается судовладельцу, для существующих судов — судовладельцем путем ссылки на судовые чертежи, схемы, технические спецификации и ведомости судовых запасов и информацию, полученную от завода-строителя и производителей оборудования в процессе модернизации и ремонта судна. Ч. II и III заполняются судовладельцем до перехода судна на предприятие по разделке [4], [8]. Для того чтобы разработать ч. I УЗОМ для эксплуатирующихся судов, необходимо разобраться в основных этапах подготовки этой части, гарантировать их унифицированное применение для различных типов судов.

Подготовка ч. I УЗОМ для эксплуатирующихся судов включает следующие пять этапов [5]:

- 1-й этап — сбор необходимой информации;
- 2-й этап — оценка собранной информации;
- 3-й этап — подготовка визуального / выборочного плана проверки;
- 4-й этап — визуальная / выборочная проверка на судне;
- 5-й этап — подготовка ч. I УЗОМ и сопутствующей документации.

Первый этап направлен на сбор подробных документов на судне, которые должны обеспечить информацией, необходимой для заполнения УЗОМ: тип, количество и местонахождение материалов. Судовладелец на данном этапе должен собрать документы, обычно хранящиеся на борту судна или в пароходстве (судоходной компании), а также соответствующие документы, которые могут находиться у завода-строителя, поставщика оборудования, материалов или классификационного общества. В рамках российского законодательства такими документами, которые, согласно нормативам [9], [10], поставляют на каждое построенное судно, судовладельцу и судоремонтному предприятию, к которому приписано судно, предприятию-строителю головного судна проекта, а также на суда единичной постройки, первое модернизируемое или ремонтируемое судно проекта, будут являться следующие документы: ведомость эксплуатационных документов, ведомости заказа изделий, ведомость инвентарного снабжения, ведомость или схема окраски судна, формуляр судовой спецификации по всем частям, чертежи общего расположения судна, механизмов и оборудования в машинных, котельных, моторных, дизель-генераторных, насосных и других помещениях, сводный перечень топлив, масел, смазок и специальных жидкостей, применяемых на судне, схема изоляции помещений с указанием типовых конструкций изоляции, схема покрытия палуб, платформ и полов, схема противопожарной защиты, ведомость запасных частей, инструмента и принадлежностей, кабельный журнал магистральных кабелей.

Необходимо отметить, что проверить все оборудование, системы и области на судне на предмет присутствия или отсутствия опасных материалов невозможно, так как общее количество таких элементов на судне может превышать несколько тысяч. Для того чтобы эта задача была практически осуществима, необходимо разработать перечень компонентов судна, согласно которому составители УЗОМ могли определять опасные материалы на исследуемом судне. Таким документом может стать *Ориентировочный перечень*, идентифицирующий оборудование, системы, области на судне, где предполагается наличие опасных материалов.

Перечень опасных материалов для идентификации представлен в табл. А и В приложения Резолюции. Следовательно, необходимо разработать *Ориентировочный перечень* для каждого материала, определенного как опасный, и требующий идентификации и учета, согласно Резолюции.

Табл. А приложения Резолюции содержит следующие четыре материала [5]: асбест, полихлорированные бифенилы (PCBs), вещества, разрушающие озон, системы, предохраняющие от обростания, которые содержат оловоорганические соединения в качестве биоцида.

В *Ориентировочный перечень* для определения асбеста могут входить такие элементы конструкции, оборудования, как валопровод, двигатель, котел, утилизационный котел, инсинератор, теплообменник, вспомогательные механизмы (насос, компрессор, очиститель масла), трубопроводы, электрическое оборудование, бортовой асбест, потолок, пол и стена в жилом помещении, пожарная дверь, система кондиционирования воздуха, такелаж, тепловые изоляционные материа-

лы, огнестойкие переборки, изоляция трубопроводов, материалы электрического кабеля, звуковая изоляция, для определения полихлорированных бифенилов — трансформатор, конденсатор, подогреватель топлива, смазочные материалы, каучук / войлочные прокладки, теплоизоляционные материалы, стабилизаторы напряжения, электромагниты, клеи / пленка, резиновая изоляция.

Использование веществ, разрушающих озон, регулируется Монреальским протоколом и Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов. И хотя почти все вещества были запрещены с 1996 г., гидрохлорфторуглероды (HCFC) могут еще использоваться до 2020 г. в охладителях для рефрижераторов, пенообразователи для изоляции перевозимого сжиженного газа, реагентах для пожаротушения.

Оловоорганические соединения включают трибутил олова (ТВТ), трифенил олова (ТРТ) и окись трибутила олова (ТВТО). Оловоорганические соединения используются как краски, препятствующие обрастанию, на днище судов и Международной конвенцией по контролю за опасными противобрастающими системами на судах предусмотрено, что все суда не должны применять или повторно использовать оловоорганические составы после 1 января 2003 г., а также после 1 января 2008 г. все суда не должны иметь такие составы на корпусах или должны иметь покрытие, которое формирует барьер, препятствующий этим соединениям выщелачиваться в море.

Табл. В приложения Резолюции содержит такие материалы, как кадмий и соединения кадмия, шестивалентный хром и соединения шестивалентного хрома, свинец и соединения свинца, ртуть и соединения ртути, полибромированные бифенилы (PBBs), полибромированные дифенилэферы (PBDEs), некоторые хлорированные парафины с короткой цепью (алканы, C10-C13, хлор) [5].

В Ориентировочный перечень для определения материалов из табл. В могут входить следующие компоненты оборудования: никелево-кадмиевая батарея, гальваническое покрытие, подшипник, краска корпуса, термометры, выключатели в датчиках уровня, датчики пожарной сигнализации, батареи питания, изоляция кабелей, невоспламеняющиеся пластики.

Второй этап подготовки УЗОМ направлен на оценку собранной информации. На данном этапе необходимо разработать контрольный список на основе данной информации, включая Ориентировочные перечни, составленные на первом этапе, оборудование, системы, области судна, где предполагается наличие опасных материалов, указанных в табл. А и В приложения Резолюции. Пример контрольного списка дан в табл. 1.

Таблица 1

Форма контрольного списка

№ пп.	Табл. А / В	Опасные материалы ¹	Расположение	Наименование оборудования	Компонент	Количество		Производитель / торговая марка	Результат анализа документов ²	Процедура проверки ³	Результат проверки ⁴	Дополнительная информация
						Ед. изм.	Всего					
I-1. Окраска и покрытия, содержащие материалы, перечисленные в табл. А, В [1]												
I-2. Оборудование и механизмы, содержащие материалы, перечисленные в табл. А, В [1]												
I-3. Элементы корпуса, содержащие материалы, перечисленные в табл. А, В [1]												

Примечания:

¹ — опасные материалы: наименование материалов;

² — результат анализа документов: «Да» — содержит, «Нет» — не содержит, неизвестно, «ПСОМ» — потенциально содержит опасный материал;

³ — процедура проверки: «Виз.» — визуальная проверка, «Выб.» — выборочная проверка;

⁴ — результат проверки: «Да» — содержит, «Нет» — не содержит, «ПСОМ» — потенциально содержат опасные материалы.

Для отображения информации о наличии опасных материалов в элементе оборудования в контрольный список введена колонка «Результат анализа документов» и когда в элементе оборудования определено наличие опасных материалов, необходимо поставить «Да» в эту колонку, обозначая тем самым содержание опасного материала в элементе. Аналогично, когда в элементе не обнаружено содержание опасного материала, в данную колонку вносится «Нет». Если невозможно определить наличие или отсутствие опасных материалов в элементе, тогда необходимо сделать отметку «Неизвестно».

На **третьем этапе** каждый пункт контрольного списка, классифицированный как «содержащий» или «не содержащий» на втором этапе, должен быть подвергнут визуальной проверке на судне. При этом в колонке контрольного списка «Процедура проверки» необходимо поставить отметку «Виз.», обозначающую проведение визуальной проверки. Для каждого пункта, классифицированного как «Неизвестно», должно быть принято решение относительно проведения выборочной проверки. Однако любой пункт, классифицированный подобным образом может быть классифицирован как «Потенциально содержащий опасный материал», при условии комплексного обоснования. Например, чтобы выполнить выборочную проверку элемента «прокладочный материал вспомогательного котла», судовладелец должен демонтировать вспомогательный котел на ремонтном заводе. Затраты этой проверки значительно выше, чем затраты на предприятии при утилизации, поэтому классификация как «Потенциально содержащий опасный материал» допустима, так как при этом не снижается опасность проверяемого элемента.

Перед проведением визуальной / выборочной проверки на судне должен быть подготовлен «План визуальной / выборочной проверки». Форма такого плана приведена в табл. 2.

Таблица 2

Форма плана визуальной / выборочной проверки

Название судна	
Номер IMO	
Валовая регистровая вместимость	
$L \times B \times H$	
Дата постройки	
Судовладелец	
Контакты (тел., факс, E-mail, адрес)	
График проверки	Визуальный осмотр: Взятие проб:
Участок проверки	
Ответственный за проверку	
Инженер проверки	
Инженер по отбору проб	
Метод отбора проб и меры против пыления асбеста	
Отбор проб фрагментов краски	
Лаборатория	
Химический метод анализа	
Место проведения визуальной / выборочной проверки	

Для предотвращения возможных инцидентов во время визуальной / выборочной проверки должен быть установлен график проверок, который позволит устранить совмещение их с другими работами на судне. Также для предупреждения потенциального воздействия опасных материалов в процессе визуальной / выборочной проверки, на судне должны быть приняты меры безопасно-

сти. Например, выборочная проверка материалов, потенциально содержащих асбест, может привести к выделению волокон асбеста в атмосферу. Таким образом, надлежащее выполнение требований техники безопасности должно быть выполнено до отбора проб.

Когда для каждого элемента в контрольном списке определен вид проверки, переходят к следующему, четвертому, этапу — проведению визуальной / выборочной проверки на судне согласно разработанному плану. При проведении проверки необходимо отметить в плане судна места проверки (контрольные точки) либо они могут быть зафиксированы фотографиями.

Результаты визуальной / выборочной проверки и предполагаемое количество опасных материалов фиксируются в контрольном списке. При этом любые системы, оборудование и / или области судна, к которым нельзя получить доступ для проверки, должны быть классифицированы как «Потенциально содержащий опасный материал». В этом случае в колонке контрольного списка «Результат проверки» необходимо поставить отметку «ПСОМ».

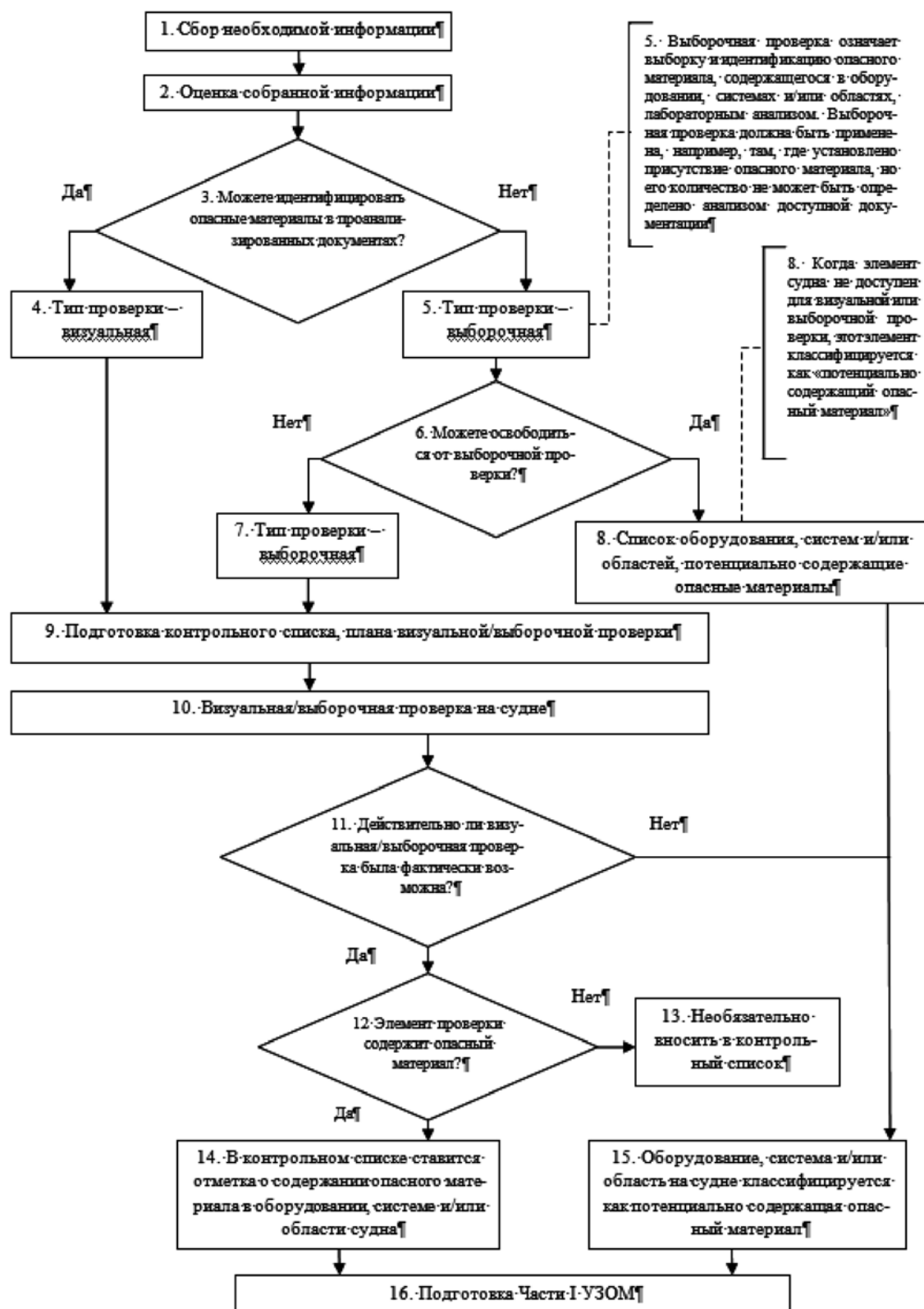
На основании результатов визуальной / выборочной проверки заполняется ч. I УЗОМ. Дополнительно к ней рекомендуется разработать схему расположения опасных материалов, которая поможет предприятию по утилизации получить визуальное представление об УЗОМ. Алгоритм разработки ч. I УЗОМ для эксплуатирующихся судов можно представить в виде блок-схемы (см. с. 77).

Выводы

Составление УЗОМ для вновь проектируемых и эксплуатирующихся судов позволяет подойти к решению задачи сведения к минимуму вредных веществ, используемых при постройке новых судов и в их оборудовании. Для эксплуатирующихся судов это сведение к минимуму количества потенциально вредных материалов, включая материалы, перевозимые как судовые запасы, а также материалы, используемые в ходе текущих ремонтов, существенных ремонтов или значительного переоборудования. Решение этой задачи достигается тем, что при работе над УЗОМ осуществляется оценка [4] следующих показателей:

- типа, величины и потенциальной опасности используемых материалов и их местоположения на судне;
- работ, предполагаемых в ходе эксплуатации судна и любых потенциально вредных отходов, которые могут быть произведены;
- обоснованности особого внимания на процесс образования потенциально вредных отходов с помощью рассмотрения следующих факторов:
 - возможности изменения состава изделия: определения компонентов, в которых используются меньше вредных веществ;
 - более чистых технологий производства, при которых образуется меньше отходов;
 - изменения процесса с целью получения меньшего количества отходов;
 - замены первичного сырья с использованием потенциально менее вредных исходных материалов или тех, при которых меньше отходов;
- переработки на месте, по замкнутому циклу, путем использования систем, перерабатывающих отходы на судне.

Таким образом, определение опасных материалов на судне с использованием УЗОМ является важным этапом защиты жизни и здоровья рабочих, а также экологической безопасности в процессе утилизации судна. При этом немаловажной задачей является поддержание в актуальном состоянии информации об опасных материалах на судне. Для этого необходимо принять требования к судам в области утилизации, например, внесением в Правила Российского Речного Регистра [11] Правил безопасной утилизации судов. Одновременно при освидетельствовании судна (классификационном, внеочередном) будет возможна актуализация данных об опасных материалах на судне.



Блок-схема разработки ч. I УЗОМ для эксплуатирующихся судов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гредасова И. Б. Анализ требований безопасности при утилизации судов / И. Б. Гредасова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 185–188.

2. Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf. (дата обращения - 11.06.2015).
3. Hiremath A. M. Ecological Engineering, Industrial Ecology and Eco-Industrial Networking Aspects of Ship Recycling Sector in India / A. M. Hiremath, S. K. Pandey, D. Kumar and S. R. Asolekar // APCBEE Procedia. — 2014. — Vol. 10. — Pp. 159-163. DOI:10.1016/J.APCBEE.2014.10.035
4. Руководство ИМО по разделке судов (резолюция А.962(23) ИМО)). — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. — 136 с.
5. Resolution MEPC.197(62)-2011. Guidelines for the Development of the Inventory of Hazardous Materials. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197\(62\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197(62).pdf) (дата обращения — 11.06.2015).
6. Гредасова И.Б. Разработка учетной записи опасных материалов на борту судна в соответствии с Гонконгской международной конвенцией о безопасной и экологически рациональной утилизации судов / И.Б. Гредасова // Актуальные проблемы защиты окружающей среды в химической промышленности и смежных областях: сборник трудов региональной научно-практической конференции. — Чебоксары: Изд-во «Порядок», 2011. — С. 31–33.
7. Гредасова И. Б. Разработка Плана утилизации судна / И. Б. Гредасова // 14-й международный научно-промышленный форум «Великие реки '2012»: труды конгресса. Т. 1. — Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. — С. 233–235.
8. Наумов В. С. Перспектива нормативно-правового регулирования безопасной утилизации судов / В. С. Наумов, И. Б. Кочнева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 32–37.
9. ГОСТ 19439.3-74. Судовые эксплуатационные документы. Типовая номенклатура документов для морских судов и судов внутреннего плавания. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gostrf.com/normadata/1/4294833/4294833897.htm> (дата обращения — 11.06.2015).
10. ГОСТ 19439.2-74. Судовые эксплуатационные документы. Формуляры. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gostrf.com/standart/8/8250.htm> (дата обращения — 11.06.2015).
11. Российский Речной Регистр. Правила: В 4 т. — Т. 1. — М., 2008. — 272 с.

ALGORITHM ACCOUNTING HAZARDOUS MATERIALS ON SHIP FOR ENVIRONMENTAL SAFETY DURING RECYCLING

Presents information about the types and quantities of hazardous materials on ship necessary to ensure environmental safety, protection of life and health of workers at ship recycling. Consider imposing requirements regarding the availability of the ship the inventory of hazardous materials (USOM). It is noted that an important task is to maintain USOM up to date by including all changes on the ship in operation. The article describes the main stages of development the Inventory of hazardous materials for existing ships. Shows the possible ways of implementation of each stages: proposed lists of documents and locations of hazardous materials that will be needed when determining the type and number; the form of checklists, necessary for the evaluation of the collected information on hazardous materials, as well as the form of visual / sampling check, which is used to confirm the presence of hazardous materials each item of the checklist.

Keywords: recycling of ships, ecological safety, hazardous materials, inventory of hazardous materials, visual / sampling check.

REFERENCES

1. Gredasova, Irina Borisovna. “The analysis of requirements on safe recycling of ships.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij* 3 (2012): 185–188.
2. Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. Web. 11 June 2015 <http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf>.

3. Hiremath, Anand M., Sachin Kumar Pandey, Dinesh Kumar, and Shyam R. Asolekar. "Ecological Engineering, Industrial Ecology and Eco-Industrial Networking Aspects of Ship Recycling Sector in India." *APCBEE Procedia* 10 (2014): 159-163. DOI:10.1016/J.APCBEE.2014.10.035
4. Руководство IMO по разделке судов (резолюция A.962(23) IMO)). СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004.
5. Resolution MEPC.197(62)-2011. Guidelines for the Development of the Inventory of Hazardous Materials. Web. 11 June 2015 <[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197\(62\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution%20MEPC.197(62).pdf)>.
6. Gredasova, Irina Borisovna. "Razrabotka uchetnoj zapisi opasnyh materialov na bortu sudna v sootvetstvi s Gonkongskoj mezhdunarodnoj konvenciej o bezopasnoj i jekologicheski racionalnoj utilizacii sudov." *Aktualnye problemy zashhity okruzhajushhej sredy v himicheskoy promyshlennosti i smezhnyh oblastjah: sbornik trudov regionalnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Cheboksary: Izd-vo "Porjadok", 2011: 31–33.
7. Gredasova, Irina Borisovna. "Razrabotka Plana utilizacii sudna." *14-j mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki '2012»: trudy kongressa Tom I*. N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO "VGAVT", 2012: 233–235.
8. Naumov, Viktor Stepanovich, and I. B. Kochneva. "The prospect of normative legal regulation of safe ship recycling." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 4(26) (2014): 32-37.
9. GOST 19439.3-74. Sudovye ehkspluatacionnye dokumenty. Tipovaya nomenklatura dokumentov dlya morskisudovisudovvnutrennegoplavaniya. Web. 11 June 2015<<http://gostrf.com/normadata/1/4294833/4294833897.htm>>.
10. GOST 19439.2-74. Sudovye ehkspluatacionnye dokumenty. Formulyary. Web. 11 June 2015 <<http://www.gostrf.com/standart/8/8250.htm>>.
11. Rossijskij Rechnoj Registr. Pravila. V 4-h tomah. T. I. M., 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наумов Виктор Степанович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
igntat@yandex.ru
Кочнева Ирина Борисовна -
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
iringre@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Naumov Viktor Stepanovich —
Dr. of Technical science, professor.
Volga state university of water transport
igntat@yandex.ru
Kochneva Irina Borisovna —
PhD, associate professor.
Volga state university of water transport
iringre@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 июня 2015.

УДК 656.615

Д. Е. Жияев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ВМЕСТИМОСТИ КОНТЕЙНЕРНОГО СКЛАДА СУХОГО ПОРТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ГРУЗОПОТОКА

В данной работе рассмотрен подход к определению минимальной необходимой вместимости склада сухого порта для обработки заданного грузопотока. Методологическая основа исследования базируется на формализации и идеализации взаимодействия морского терминала и сухого порта. Рассмотрены составляющие элементы контейнерного склада сухого порта и определен порядок расчета его основных параметров — объем контейнерного склада и площадь каждой из площадок (для импортных грузов, экспортных грузов и порожних контейнеров). В условиях заданной интенсивности импортных и экспортных грузопотоков определена годовая и среднесуточная пропускная способность сухого порта. Исходя из этого, сформулирована такая оптимизационная задача для сухого порта, как нахождение минимальных зна-

чений параметров контейнерного склада, обеспечивающих выполнение функций сухого порта при заданной пропускной способности и переменных значениях входящих грузопотоков.

Ключевые слова: сухой порт, контейнерный склад, оптимизация контейнерного склада.

ОПТИМИЗАЦИЯ работы склада — актуальная проблема любого транспортного процесса, связанная с тем, что даже современный уровень развития транспортных коммуникаций не позволяет состыковать во времени и пространстве физическое перемещение груза с документационными формальностями. При интермодальной перевозке также в большинстве случаев груз проходит один или несколько этапов складирования в пунктах перевалки. При этом в отсутствие заинтересованности морских терминалов в хранении грузов как к непрофильному для них бизнесу складские площади зачастую подвергаются сокращению за счет более профильных структур, таких как подъездные пути, зоны обработки авто- и железнодорожного транспорта, либо выносятся за пределы терминала. Одновременно склад зачастую является «узким» местом с точки зрения пропускной способности терминала как логистической системы [1] – [5].

Цель и методология исследования. Целью исследования является определение минимально необходимой вместимости контейнерного склада сухого порта для обработки заданного грузопотока.

В системе морской терминал — сухой порт организуются два встречных потока: поток экспортных и поток импортных грузов. Разница пропускных способностей элементов системы терминала может свидетельствовать о нерационально используемых материальных (площадей, мощностей) и человеческих ресурсах. Сочетание элемента с минимальной пропускной способностью и элемента с более высокой пропускной способностью приводит к накоплению контейнерных грузов и образованию очередей на элементе с минимальной пропускной способностью [6]. При этом материальные и человеческие ресурсы, затрачиваемые в процессе обеспечения деятельности элемента с более высокой пропускной способностью, расходуются неэффективно.

Вместимость складов должна быть рассчитана на максимально возможные значения объемов переваливаемых грузов и не более того, поскольку неиспользуемые складские площади требуют дополнительных затрат на их обслуживание (аренда территории, охрана, освещение, сигнализация, электрификация, механизация, обслуживание промышленных площадей, оплата персонала и др.) [7]. Излишние (неиспользуемые) складские площади должны быть выведены из промышленной эксплуатации либо репрофилированы на выполнение других задач (длительное хранение, субаренда, производство, жилые и офисные помещения и др.). Оптимизации подлежат как стационарные и мобильные объекты (промышленные сооружения, погрузочная техника, автотранспорт, железнодорожный транспорт), так и материально-технические, финансовые и людские ресурсы, необходимые для поддержания рациональной производственной деятельности на терминалах [8].

Современные порты и терминалы проектируются с учетом определенных предположений разработчиков о том, что ситуации простоя или ожидания морских или сухопутных транспортных средств недопустимы, а интенсивности входящих и исходящих грузопотоков на терминалы близки к некоторым средним значениям [9]. Однако на практике возможны значительные отклонения параметров грузопотоков от ожидаемых значений.

Содержательная постановка задачи. Импорт. Даны морской терминал и сухой порт малой удаленности. Транспортное взаимодействие между ними в целях настоящего исследования осуществляется железнодорожным транспортом. На морской терминал груз поступает морским транспортом, затем он перемещается железнодорожным транспортом в сухой порт и далее, после выполнения таможенных формальностей, направляется грузополучателю.

Экспорт. Грузоотправитель формирует заявки железнодорожному оператору на отправку контейнерного груза, который доставляется в сухой порт и после выполнения таможенных формальностей направляется в морской терминал для последующей отправки морем. По определению

пропускная способность сухого порта должна быть меньше пропускной способности морского терминала. Данное обстоятельство обусловлено тем, что часть контейнеров вывозится с морского терминала без участия сухого порта:

$$Q_{st} \ll Q_{mt}.$$

где Q_{st} — пропускная способность сухого порта; Q_{mt} — пропускная морского терминала.

В случае, если грузооборот морского порта снижается (как это наблюдается на примере АО «ПКТ» г. Санкт-Петербурга в 2014 – 2015 гг.), уменьшение количества переваливаемых грузов также должно отразиться на загрузенности сухого порта [10] – [13]. Снижение тарифов на услуги сухого порта в условиях нерационального использования собственных ресурсов и площадей может привести к падению доходности данного предприятия вплоть до состояния убыточности. Следует определить диапазон безубыточности сухого порта в условиях снижающегося грузооборота за счет оптимизации внутренних ресурсов, и в частности контейнерного склада. При определенных значениях грузооборота функционирование предприятия сухого порта представляется нецелесообразным в связи с невозможностью дальнейшего сокращения используемых собственных ресурсов и площадей. В более выгодной ситуации по сравнению с сухим портом в условиях падения грузоперевозок находится морской терминал, поскольку он является монопольным звеном между грузоотправителем и морским перевозчиком.

Потенциальные возможности обработки грузов в сухом порту определяются пропускной способностью сухого порта, которая определяется, в свою очередь, минимальным значением из множества пропускных способностей железнодорожного грузового, складского, и автомобильного фронтов:

$$Q_{dp}^p = \min\{Q_{scf}; Q_{ssf}; Q_{saf}\}, \quad (1)$$

где Q_{dp}^p — пропускная способность сухого порта; Q_{scf} — пропускная способность железнодорожного грузового фронта; Q_{ssf} — пропускная способность складского фронта; Q_{saf} — пропускная способность автомобильного тылового фронта.

Как один из важнейших инфраструктурных элементов сухого порта, склад может быть представлен в виде трех составляющих: площадки для импортных грузов, площадки для экспортных грузов и площадки для порожних контейнеров. Вводится следующее допущение: на контейнерную площадку поступают экспортные и импортные грузы, динамика которых различна и существует преобладание одной динамики над другой. Определим объем площадки для импортных грузов, исходя из следующего условия.

Дано: интенсивность поступления импортных грузов в сухой порт, которая рассчитывается на основе входящей интенсивности поступления грузов, с которой не справляется морской терминал с учетом прогнозных значений роста переваливаемых грузов в TEUs. Исходя из этой интенсивности, рассчитывается емкость контейнерной площадки и её пропускная способность.

Найти объем площадки для импортных грузов.

Пропускная способность площадки для импортных и экспортных грузов должна быть не меньше проектируемой пропускной способности сухого порта Q_{dp}^p :

$$Q_{idp} + Q_{edp} \geq Q_{dp}^p, \quad (2)$$

где Q_{idp} — пропускная способность площадки для импортных грузов; Q_{edp} — пропускная способность площадки для экспортных грузов, и равна максимальной интенсивности убытия $Q_{idp}^{ex}(V_{dp}^i)$ импортных и экспортных $Q_{edp}^{ex}(V_{dp}^e)$ грузов при максимальной интенсивности их поступления $Q_{idp}^{en}(V_{dp}^i)$, $Q_{edp}^{en}(V_{dp}^e)$ с учетом объема площадки для импортных V_{dp}^i и экспортных V_{dp}^e грузов.

Общий объем контейнерного склада будет равен сумме объемов экспортной, импортной и площадки для порожних контейнеров:

$$V_{dp} = V_{dp}^i + V_{dp}^e + V_{pdp}, \quad (3)$$

где V_{dp}^i — объем площадки для импортных грузов; V_{dp}^e — объем площадки для экспортных грузов; V_{pdp} — объем площадки для порожних контейнеров.

В связи с различными интенсивностями поступления входящих импортных грузопотоков $(\Delta Q_{st} - Q_{dp}^{is})$ на контейнерной площадке происходит накопление потоков импортных грузов, которые задерживаются на время t_{dp}^{ic} их таможенного оформления, и потоков грузов с интенсивностями Q_{dp}^{ic} , содержащихся на площадке по другим причинам (разукomплектование, перетарка, интершип-пинг, временное хранение, арест и др.) в течение времени t_{dp}^{ic} .

Требуемый объем площадки для импортных грузов в TEUs рассчитывается как сумма первого интеграла разности интенсивности входящих импортных грузов по длительности их таможенного оформления и второго интеграла интенсивности накопления импортных грузов по другим причинам, исходя из длительности их нахождения в сухом порту:

$$V_{dp}^i = \int_0^{t_{dp}^{ic}} (\Delta Q_{st} - Q_{dp}^{is}) dt + \int_0^{t_{dp}^{ic}} Q_{dp}^{is} dt. \quad (4)$$

Размерности интенсивностей в выражении (4) следует привести к единой величине по времени с переменной интегрирования t .

Исходя из площади, занимаемой одним TEU (S_{TEU}), и предельной высоты штабелирования контейнеров на контейнерной площадке — $\max h_k$, можно рассчитать площадь S_{dp}^i , занимаемую контейнерной площадкой с импортными грузами с учетом установки необходимого перегрузочного оборудования и технологических проездов, соединяющих объекты сухого порта — S_{dp}^{it} :

$$S_{dp}^i = S_{TEU} \cdot \frac{V_{dp}^i}{\max h_k} + S_{dp}^{it}. \quad (5)$$

Определение пропускной способности площадки для экспортных грузов. Для расчета емкости площадки для экспортных грузов используется прогнозная модель, учитывающая динамику изменения объема экспортных грузов, с которыми будет работать терминал.

В связи с различной интенсивностью поступления входящих экспортных грузов на контейнерной площадке происходит накопление потоков экспортных грузов с учетом прогнозных значений роста объема перевалки экспортных грузов $(\max Q_{edp}^p + \Delta Q_{dp}^p - Q_{dp}^{es})$, которые задерживаются на время t_{dp}^{ea} их таможенного оформления и накопления судовой партии, а также потоков грузов с интенсивностью Q_{dp}^{es} , содержащихся на площадке другим причинам (разукomплектование, перетарка, временное хранение, арест и др.), на время t_{ds}^{es} .

Требуемый объем экспортной контейнерной площадки в TEUs рассчитывается как сумма первого интеграла интенсивности входящих экспортных грузов по длительности их таможенного оформления и второго интеграла интенсивности накопления входящих экспортных грузов по другим причинам, исходя из длительности их нахождения в сухом порту:

$$V_{dp}^e = \int_0^{t_{dp}^{ec}} (\max Q_{edp}^p + \Delta Q_{dp}^p - Q_{dp}^{es}) dt + \int_0^{t_{dp}^{es}} Q_{dp}^{es} dt. \quad (6)$$

Размерность интенсивности в выражении (6) следует привести к единой размерности по времени с переменной интегрирования t .

По аналогии с выражением (5) площадь контейнерной площадки с экспортными грузами равна:

$$S_{dp}^e = S_{TEU} \cdot \frac{V_{dp}^e}{\max h_k} + S_{dp}^{et}. \quad (7)$$

Определение пропускной способности площадки порожних контейнеров. Площадка порожних контейнеров формируется за счет освобожденных от импортных грузов и не заполненных экспортными грузами контейнеров. Поэтому разность интенсивностей в TEUs импортных и экспортных грузопотоков, умноженная на время заполнения склада $(\Delta T = T_f - T_e)$, даст величину объема склада порожних контейнеров:

$$V_{pdp} = \int_{T_e}^{T_f} (Q_{idp} - Q_{edp}) dT. \quad (8)$$

По аналогии с выражением (5) площадь склада порожних контейнеров определяется в виде

$$S_{dp}^p = S_{TEU} \cdot \frac{\max V_{pdp}}{\max h_k} + S_{dp}^{pt}. \quad (9)$$

Годовой грузооборот сухого порта будет определяться суммой суточных интенсивностей экспортных и импортных грузопотоков за 365 сут года:

$$\Lambda_{dp} = \sum_{i=1}^{i=365} (= \int_{T_e}^{T_f} (Q_{idp} + Q_{edp}) = \int_1^{365} (Q_{idp} + Q_{edp}) di, \quad (10)$$

где Λ_{dp} — годовой грузооборот сухого порта; Q_{idp} — суточная интенсивность экспортных грузопотоков; Q_{edp} — суточная интенсивность импортных грузопотоков.

Средние значения суточных интенсивностей экспортных и импортных грузопотоков равны отношению годового грузооборота сухого порта к количеству суток в году:

$$Q_{cp} = \frac{\Lambda_{cp}}{365}, \quad (11)$$

где Q_{cp} — среднесуточный грузооборот сухого порта.

Оптимизационная задача для сухого порта формулируется как нахождение минимальных значений параметров контейнерного склада, обеспечивающих выполнение функций сухого порта при заданной его пропускной способности и переменных значениях грузопотоков:

$$\begin{cases} V_{dp} \rightarrow \min; \\ Q_{dp}^p = \text{const}; \\ Q_{cp} = \text{var}. \end{cases} \quad (12)$$

В случае, если экспортные грузопотоки превысят импортные грузопотоки, то тогда порожние контейнеры будут прибывать вместе с импортным грузом, как это происходит сейчас, например, в Китае. При этом если интенсивность поступления импортных и экспортных грузопотоков будет приблизительно одинакова, то площади, отведенные под площадку для экспортных контейнеров, можно будет использовать для хранения контейнеров с экспортным или импортным грузом, тем самым, в случае необходимости, повышая пропускную способность склада.

Выводы

1. Разница пропускной способности элементов системы терминала может свидетельствовать о нерационально используемых материальных (площадей, мощностей) и человеческих ресурсах.
2. Излишние (неиспользуемые) складские площади должны быть выведены из промышленной эксплуатации либо перепрофилированы для выполнения других задач (длительное хранение, субаренда, производство, жилые и офисные помещения и др.).
3. При расчете пропускной способности сухого порта необходимо анализировать каждый грузовой фронт с целью выявления потенциальных рисков накопления контейнеров внутри фронта, поскольку многие из этих рисков не поддаются вычислению, однако могут оказывать существенное влияние на реальную пропускную способность фронта.
4. Требуемый объем импортной (экспортной) контейнерной площадки рассчитывается как сумма одного интеграла разности интенсивностей входящих и исходящих грузов по длительности их таможенного оформления и второго интеграла интенсивности накопления импортных (экспортных) грузов в связи с нештатными причинами по длительности их нахождения в сухом порту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Король Р. Г. Факторы, влияющие на распределение грузопотока между морским портом и тыловым терминалом «сухим портом» / Р. Г. Король // Повышение эффективности перевозок и транспортная логистика: сб. науч. тр. — Хабаровск: ДВГУПС, 2012. — С. 59–64.

2. Кузнецов А. Л. Сравнение различных методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 4 (54). — С. 18–20.
3. Кузнецов А. Л. Морские и сухопутные порты в новой мировой системе грузораспределения / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1 (55). — С. 9–12.
4. Степанов А. Л. Проектирование морских терминалов / А. Л. Степанов, А. Л. Кузнецов, О. И. Титберия // Терминал. — 2002. — № 4–5 (34–35). — С. 26–31.
5. Панова Ю. Н. Обоснование этапности развития тыловых контейнерных терминалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Ю. Н. Панова. — СПб.: ПГУПС, 2012. — 148 с.
6. Король Р. Г. Принципы выбора месторасположения тыловых терминалов «сухих портов» / Р. Г. Король // Инновационные технологии в автоматике, информатике и телекоммуникациях: сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. — С. 252–257.
7. Жилиев Д. Е. Анализ эффективности технологии «сухой порт» (на примере «Большого порта Санкт-Петербург») / Д. Е. Жилиев, А. В. Есенов // Речной Транспорт (XXI век). — 2015. — № 2 (73). — С. 41–43.
8. Малыхин М. О. Обоснование исходных данных при моделировании вывоза контейнеров из порта на тыловой терминал с применением технологии «блок-трейн» / М. О. Малыхин, А. В. Кириченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 22–30.
9. Тарakanов Н. Л. Формирование терминально-распределительных комплексов в системе взаимодействия с интегрированными логистическими платформами морских портов / Н. Л. Тараканов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 108–111.
10. Грузооборот морских портов России за январь-март 2015 г. [Электронный ресурс]: Официальный сайт Ассоциации морских торговых портов. — Режим доступа <http://www.morport.com/rus/publications/document1661.shtml> (дата обращения: 15.08.2015).
11. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Концепция сухих портов в мире и в Российской Федерации / В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Системный анализ и логистика на транспорте: Материалы 2-й Межвуз. науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 76–89.
12. Roso V. Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note / V. Roso // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2007. — Vol. 12. — № 7. — Pp. 523–527. DOI:10.1016/j.trd.2007.07.001
13. Roso V. Emergence and significance of dry ports: the case of the Port of Göteborg / V. Roso // World Review of Intermodal Transportation Research. — 2009. — Vol. 2. — № 4. — Pp. 296–310.

DETERMIMINAION OF MINIMUM NECESSARY STORAGE CAPACITY OF A DRY PORT CONTAINER YARD WITH A SCHEDULED CARGO TURNOVER

This article is devoted to the definition of the minimum necessary storage capacity of dry port container yard with a scheduled cargo turnover. The methodological basis of the study is based on the formalization and the idealization of the interaction of marine terminal and dry port. The components of dry port container yard have been studied and the method of calculation of its main characteristics i.e. container yard capacity and space required for each of the areas have been defined (for import and export cargoes as well as for empty containers). Under the set conditions of import and export intensities of arrival of goods the average annual and daily throughput of dry port is determined. Based on this has been formed an optimization problem for a dry port as finding a minimum containers depot capacity ensuring dry port operation under the set throughput and variable incoming cargo flows.

Keywords: dry port, container depot, container yard optimization.

REFERENCES

1. Korol, R. G. “Faktoy, vliiaiushchie na raspredelenie gruzopotoka mezhdu morskim portom i tylovym terminalom «sukhim portom».” *Povyshenie effektivnosti perevozok i transportnaia logistika: sbornik nauchnykh trudov*. Khabarovsk: DVGUPS, 2012: 59–64.

2. Kuznetsov, A. L., and E. J. Kozlova. "The comparative study of different assessment techniques for the stack size at the container terminal's technologic design stage." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2008): 9–14.
3. Kuznetsov, A. L. "Sea and dry ports in the new world cargo distribution system." *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (2009): 9–12.
4. Stepanov, A. L., A. L. Kuznecov, and O. I. Titberija. "Proektirovanie morskikh terminalov." *Terminal* 4–5(34–35) (2002): 26–31.
5. Panova, Ju. N. Obosnovanie etapnosti razvitiia tylovykh konteinernykh terminalov: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation. SPb.: PGUPS, 2012.
6. Korol, R. G. "Printsipy vybora mestoraspologheniia tylovykh terminalov «sukhikh portov»." *Innovatsionnye tekhnologii v avtomatike, informatike i telekommunikatsiiakh: sb. trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2013: 252–257.
7. Zhilyaev, D. E., and A. V. Esenov. "The analysis of effectiveness of the technology «dry port» (on the example of «Big port «Saint-Petersburg»)." *River transport (XXIst century)* 2 (73) (2015): 41–43.
8. Malihin, M. O., and A. V. Kirichenko. "Justification of the original data in the simulation of containers' carriage from sea terminal to dry port with the use of technology «block-train»." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 4(32) (2015): 22–30.
9. Tarakanov, N. L. "Formation of terminal-distribution complexes in the system of collaboration with the integrated logistics platforms of sea-ports." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 2(21) (2013): 108–112.
10. Gruzooborot morskikh portov Rossii za ianvar-mart 2015 g. Web. 15 Aug. 2015 <<http://www.morport.com/rus/publications/document1661.shtml>>.
11. Shcherbakova-Sliusarenko, V. N. "Kontseptciia sukhikh portov v mire i v Rossiiskoi Federatsii." *Sistemnyi analiz i logistika na transporte: Materialy 2-oi Mezhvuzovskoi nauch.-prakt. konf.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2014: 76–89.
12. Roso, Violeta. "Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12.7 (2007): 523–527. DOI:10.1016/j.trd.2007.07.001
13. Roso, V. "Emergence and significance of dry ports: the case of the Port of Göteborg." *World Review of Intermodal Transportation Research* 2.4(2009): 296–310.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жиляев Дмитрий Евгеньевич —
аспирант.
Научный руководитель:
Васильев Юрий Иванович —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Dmitzhil@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhiliaev Dmitrii Evgnievich —
Postgraduate.
Supervisor:
Vasiliev Yurii Ivanovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Dmitzhil@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 августа 2015 г.

УДК 656.027

Д. А. Головцов

ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ СУДОВ С РАЗЛИЧНОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ МОРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

В статье рассматривается одна из наиболее важных задач транспортной логистики — задача маршрутизации транспортных средств. В частности, предлагается метод решения одной из наиболее актуальных для практического применения подзадач проблемы маршрутизации, а именно, задачи маршрутизации судов разной грузоподъемности. Для нахождения решения задачи предлагается использовать

двухфазный алгоритм: на первом этапе выполняется группировка вершин для каждого будущего маршрута (кластеризация), на втором этапе — решение задачи коммивояжёра для каждой полученной группы. В первой фазе вычислений применяется так называемый алгоритм GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure). Математическая модель задачи маршрутизации судов разной грузоподъёмности разделяется на две подзадачи, первая из которых представляет собой обобщённую задачу о назначениях. Группировка вершин и решение обобщённой задачи о назначениях происходит в рамках реализации метаэвристики GRASP.

Ключевые слова: маршрутизация транспортных средств, маршрутизация судов разной грузоподъёмности, двухфазный алгоритм, задача коммивояжёра, GRASP.

Условия постановки задачи

Одной из ключевых проблем, возникающих в области транспортной логистики, является построение эффективных, с точки зрения стоимости маршрутов объезда транспортным средством, пунктов получения груза. В понятие стоимости в данном случае включаются любые затраты, возникающие в процессе объезда потребителей транспортным средством, которые могут определяться через длину маршрута, время в пути и количество потребляемого топлива. Продолжающееся комплексное развитие российской Арктики предполагает функционирование многочисленных пунктов завоза. Потребность в оптимальном планировании снабженческих перевозок определяет растущая актуальность задачи маршрутизации (известна как задача маршрутизации транспортных средств (ЗМТС) [1], [2] и является обобщением задачи коммивояжёра [3].

Математическая модель данной задачи может быть описана в так называемой MTZ (Miller — Tucker — Zemlin) формулировке, авторы которой Миллер, Такер и Землин вначале предложили данную модель для ЗК в работе [4], а затем в работах [1], [5] эта модель была адаптирована для асимметричной ЗМТС.

Существуют разновидности ЗМТС, получаемые с помощью введения дополнительных ограничений. Например, задача маршрутизации транспорта с ограничением по времени предполагает, что груз потребителю должен быть доставлен в определенный промежуток времени, ЗМТС с разделённой доставкой допускает посещение вершин не одним, а несколькими транспортными средствами, ЗМТС с несколькими исходными пунктами (депо) предполагает, что каждый маршрут должен начинаться и заканчиваться в одном из них и т. д. В то же время, во всех указанных случаях основной объект задачи — транспортные средства — имеют фиксированную (одинаковую) грузоподъёмность, что для достаточно большого круга практических задач не соответствует действительности.

Кроме того, учитывая многообразие и разнотипность судов, использующихся в районах российской Арктики и Крайнего Севера для снабжения населённых пунктов различными товарами первой необходимости, а также для обеспечения опорных баз Северного морского пути и углеводородных месторождений на шельфе и побережье материалами для строительства и эксплуатации этих объектов, необходимо принимать во внимание различную грузоподъёмность судов.

Алгоритмизация задачи для судов различной грузоподъёмности

Соответствующая задача может быть сформулирована как модель целочисленного линейного программирования. Однако ни один из известных методов не даёт надежных результатов при её решении задачи. Поиск решений ЗМТС ведётся в направлении разработки различных эвристических методов. Одним из самых ранних и известных алгоритмов для решения ЗМТС является алгоритм Кларка — Райта (Clarkeand — Wright) [6].

В последнее время усилия направлены в основном на разработку так называемых *метаэвристик*. Особенность метаэвристических алгоритмов состоит в том, что они не дают точного описания порядка действий для решения задачи и каждый конкретный случай должен быть дополнительно конкретизирован путём подбора значений управляющих параметров. Одним из луч-

ших по качеству найденного решения алгоритмов решения ЗМТС, основанных на поиске с запретами, считается алгоритм Османа [7]. Хорошо зарекомендовали себя по таким показателям, как точность, скорость выполнения и простота реализации, так называемые *двухфазные алгоритмы*. Эти алгоритмы, выполняющие сначала кластеризацию узлов, а затем решающие ЗК для каждого кластера, рассмотрены в работах [1], [8], [9], а алгоритмы, работающие в обратном порядке, — в работах [10], [11].

Основная сложность в реализации двухфазных алгоритмов связана с тем, что в их работе постоянно учитываются две величины: стоимость маршрута и суммарная потребность в грузе вершин-клиентов, включенных в маршрут. Стремление к наилучшему распределению загрузки судов может негативно сказываться на стоимости маршрута и наоборот. Другая сложность заключается в том, что потребность в грузе у грузополучателей может быть достаточно неравномерной и приводить к риску того, что добавление вершин на основе оценки стоимости решения в самый последний момент нарушит ограничение грузоподъемности. Для решения данных проблем наиболее адекватной представляется адаптация под поставленные задачи алгоритма, предложенного в работе [8].

Руководствуясь изложенным подходом, трёхиндексную модель ЗМТС с разной грузоподъемностью судов можно представить в следующем виде [12]:

$$F = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1, \quad \forall i \in V'; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} = K; \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K; \quad (4)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + Q_k x_{ijk} \leq Q_k - q_j, \quad \forall i, j \in V', k = 1, \dots, K, \quad i \neq j; \quad (5)$$

$$q_i \leq u_{ik} \leq Q_k, \quad \forall i \in V', k = 1, \dots, K; \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, \quad k = 1, \dots, K; \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad k = 1, \dots, K, \quad (8)$$

где $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ — множество всех вершин; v_0 — вершина-депо, в которой построенные маршруты должны начинаться и заканчиваться; $V' = V \setminus \{v_0\}$ — множество из n целевых вершин для посещения; c_{ij} — стоимость переезда между вершинами v_i и v_j ; K — количество судов; Q_k — грузоподъемность k -го судна; q_i — величина потребности узла ($q_0 = 0$); u_{ik} — переменная, представляющая собой загрузку транспортного средства после посещения узла i ,

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если судно } k \ (k = 1, \dots, K) \text{ следует из пункта } i \text{ в пункт } j; \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если груз для пункта } i \text{ доставляется судном } k; \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases}$$

Ограничения (2) — (4) задают следующие условия: каждый порт доставки груза обслуживается только одним судном; используется ровно K судов; судно, заходящее в порт, должно его покинуть. Условие (5) задаёт ограничение по грузоподъемности различных судов, условие (6) — загрузку k -го судна после захода в порт i .

Заменив в трёхиндексной модели ЗМТС ограничения (5) и (6) на отдельные ограничения по грузоподъёмности и ограничения по запрещению подциклов [13], получим:

$$F = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1, \quad \forall i \in V'; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} = K; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V'} q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, K; \quad (12)$$

$$\sum_{j \in V'} x_{ijk} = \sum_{j \in V'} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V', \quad 2 \leq |S|, \quad k = 1, \dots, K; \quad (14)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, k = 1, \dots, K; \quad (15)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K, \quad (16)$$

где S — некоторое подмножество множества V' .

Разделим данную модель на две подзадачи. Первая подзадача:

$$Z = \sum_{k=1}^K f(y_k) \rightarrow \min; \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1, \quad \forall i \in V'; \quad (18)$$

$$\sum_{i \in V'} q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad k = 1, \dots, K; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} = K; \quad (20)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K, \quad (21)$$

где $f(y_k)$ — целевая функция, минимизирующая суммарную стоимость обхода каждым судном соответствующих портов.

Целевая функция может быть определена решением второй подзадачи:

$$f(y_k) = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \rightarrow \min; \quad (22)$$

$$\sum_{j \in V'} x_{ijk} = \sum_{j \in V'} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K; \quad (23)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V', \quad 2 \leq |S|, \quad k = 1, \dots, K; \quad (24)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, \quad k = 1, \dots, K. \quad (25)$$

Модель (17) – (21) представляет собой обобщённую задачу о назначениях (ОЗН), в которой, исходя из выбранного стоимостного критерия, за каждым судном закрепляются определённые порты. Затем для каждого судна и закреплённых за ним портов решается задача коммивояжёра.

Для решения ОЗН функцию $f(y_k)$ можно найти, применив следующий алгоритм. На начальном этапе за каждым судном $1, \dots, K$ закрепим соответствующий порт $i_1, \dots, i_k$. Определим параметр d_{ik} как стоимость включения порта i в маршрут судна k из депо в порт i_k и обратно:

$$d_{ik} = \min [c_{0i} + c_{ii_k} + c_{i_k 0}, c_{0i_k} + c_{i_k i} + c_{i0}] - [c_{0i_k} + c_{i_k 0}], \quad (26)$$

где c_{ij} — Евклидово расстояние между пунктами i и j .

Тогда функция $f(y_k)$ может быть записана в виде

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in V \setminus V_0} d_{ik} y_{ik}, \quad (27)$$

где V_0 — множество портов, закреплённых за судами на начальном этапе.

Таким образом, решение ЗМТС с различной грузоподъёмностью транспортных средств состоит из трёх этапов:

- 1-й этап — за каждым судном закрепляется начальный порт для доставки груза;
- 2-й этап — решается ОЗН по закреплению остальных портов за судами с учётом критерия d_{ik} ;
- 3-й этап — решается ЗК для каждого судна.

Критическим моментом, оказывающим влияние на конечный результат, является организация первого этапа вычислений. В работе [7] предлагается разделять область вокруг депо на конусы. Общее количество груза, потребляемого в каждом конусе, должно быть равно грузоподъёмности транспортного средства. Затем по определённым правилам на биссектрисе каждого конуса находится узел, который будет являться начальным.

Применимость данного способа решения задач, где транспортные средства имеют разную грузоподъёмность, представляется проблематичным. Более предпочтительным вариантом поиска решения на первом этапе является применение *многостартовой метаэвристики GRASP* [14], [15], выполняющейся в итерационном режиме и состоящей из двух фаз: фазы нахождения допустимого решения и фазы локального поиска. В фазе локального поиска исследуются окрестности допустимого решения с целью нахождения локального минимума. Лучшее из найденных допустимых решений и будет являться решением задачи.

В рассматриваемой задаче оценить множество всех возможных портов кандидатов для первого этапа решения целесообразно по одному из наиболее важных показателей — *фактической транспортной работе*:

$$P_i = d_{0i} q_i, \quad (28)$$

где d_{0i} — расстояние от депо до i -го порта; q_i — потребность в грузе i -го порта.

Наиболее предпочтительными для начального выбора являются порты с большей транспортной работой. Затем из полученного множества, на основании выражения

$$P \in [P_{\min} + \alpha(P_{\max} - P_{\min}), P_{\max}] \quad (29)$$

составляется список RLC (*Restricted Candidate List*), где α — пороговый коэффициент, который принадлежит интервалу от нуля до единицы $\alpha \in [0, 1]$. В случае, если $\alpha = 0$, то это соответствует чистому жадному алгоритму, при $\alpha = 1$ алгоритм будет работать случайным образом. Из множества RLC случайным образом выбираются K кандидатов (по количеству транспортных средств). Для данного начального набора портов решается ОЗН, и полученное значение целевой функции сравнивается с минимальным значением целевой функции, полученным ранее для другого начального набора портов. Меньшее значение сохраняется для сравнения с результатом, получаемым на следующей итерации, а также выполняется поиск локального минимума. После завершения определённого количества итераций найденное решение ОЗН, соответствующее минимальному значению целевой функции, используется для решения K задач коммивояжёра.

Программа вычислений была реализована в среде программирования MATLAB. Также, для увеличения скорости вычислений ограничение целочисленности, накладываемое на искомую переменную y_{ik} , заменено ограничением $0 \leq y_{ik} \leq 1$. В процессе вычислений, проведенных для 10, 16, 20 пунктов доставки груза и трех транспортных средств (данные о расстояниях, требуемом количестве груза в пунктах назначения, грузоподъемности транспортных средств, вычисленные случайным образом), были получены следующие результаты: во всех случаях разработанным эвристическим способом были найдены оптимальные маршруты (оптимальные маршруты предварительно вычислялись методом полного перебора), максимальное количество итераций принималось равным 1000, лучшее значение коэффициента $\alpha = 0,1$.

Выводы

1. Эвристический алгоритм для ЗМТС, как и любые другие эвристические алгоритмы, можно оценить по четырём критериям: точность вычислений, скорость вычислений, простота реализации алгоритма и универсальность алгоритма, т.е. применимость алгоритма для решения других разновидностей ЗМТС и необходимость предварительной настройки параметров для каждого нового набора данных (для метаэвристик) [16].

2. Поскольку целью данной работы являлось решение ЗМТС для различных типов судов, предложенный алгоритм почти без изменений адаптируется для ЗМТС с одинаковой грузоподъемностью. Применимость его для решения других разновидностей ЗМТС представляется проблематичной. Настраиваемым параметром для метаэвристики GRASP является пороговый коэффициент, для которого на этапе вычислительного эксперимента при случайном наборе данных было определено наилучшее значение, не требующее изменения для других наборов данных. Таким образом, данный алгоритм применим без модификаций только для конкретных разновидностей ЗМТС.

3. В связи с тем, что предложенный алгоритм является синтезом двух алгоритмов: простого кластерного алгоритма и метаэвристики GRASP, относительно несложных в реализации, заключительный алгоритм также является достаточно простым в реализации. Дополнительную незначительную сложность создаёт обобщённая задача о назначениях, однако её математическая модель намного проще начальной модели ЗМТС за счёт уменьшения количества ограничений и переменных, а также замены бинарной переменной y_{ik} непрерывным ограничением.

4. Вычисления были реализованы в среде программирования MATLAB (R2010b) с использованием специальных функций для решения задач математического программирования. Однако данная задача может быть решена с помощью более распространённого программного продукта «Microsoft Excel» и его надстройки «Поиск решения», параметры которого будут задаваться с помощью функций в макросе, созданном на VBA (Visual Basic for Applications). Существуют также специальные платные оптимизационные пакеты, например, CPLEX, Solver Platform SDK, предоставляющие высокоуровневый API (Application Programming Interface) для таких языков программирования, как C++, C#, F#, Visual Basic, VB.NET и Java.

5. Используемый в данной работе двухфазный алгоритм Фишера — Джекумара [8] даёт среднее отклонение вычисленных значений от лучших известных результатов в 3,29 %, что достаточно много [16]. Предложенная методика позволяет найти оптимальное решение, однако с меньшим количеством узлов для обхода.

6. Сравнительный анализ скорости вычислений затруднителен ввиду разнородности аппаратной и программной частей компьютеров, а также различий их исходных данных. Таким образом, предложенная методика может быть использована на тактическом уровне планирования доставки грузов для выбора маршрутов судов на конечном этапе доставки.

7. Следует отметить, что основная доля временных затрат в процессе решения задачи приходится на решение ОЗН. Поэтому при достаточно большом количестве итераций необходимо предусмотреть механизм, позволяющий сократить время, затраченное на вычисление каждой из ОЗН. Таким механизмом, на наш взгляд, является замена нахождения оптимального решения для каждой ОЗН нахождение только нижней границы значения целевой функции исходной задачи [17]. Таким образом,

на каждой итерации сравниваются не оптимальные решения ОЗН, а нижние границы. После этого для начального набора узлов с минимальной нижней границей находится оптимальное решение ОЗН. В качестве нижней оценки ОЗН могут быть применены всевозможные линейные релаксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christofides N. The vehicle routing problem / N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth // Combinatorial Optimization. — 1979. — Pp. 315–338.
2. Maffioli F. The vehicle routing problem: A book review / F. Maffioli // Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies. — 2003. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 149–153.
3. Lawler E. L. The traveling salesman problem: a guided tour of combinatorial optimization / E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. R. Kan, D. B. Shmoys. — New York: Wiley, 1985. — 476 p.
4. Miller C. E. Integer programming formulation of traveling salesman problems / C. E. Miller, A. W. Tucker, R. A. Zemlin // Journal of the ACM (JACM). — 1960. — Vol. 7. — № 4. — Pp. 326–329.
5. Desrochers M. Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints / M. Desrochers, G. Laporte // Operations Research Letters. — 1991. — Vol. 10. — № 1. — Pp. 27–36.
6. Clarke G. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points / G. Clarke, J. W. Wright // Operations Research. — 1964. — Vol. 12. — № 4. — Pp. 568–581.
7. Osman I. H. Metastrategy Simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem / I. H. Osman // Annals of Operations Research. — 1993. — Vol. 41. — № 4. — Pp. 421–451.
8. Fisher M. A generalized assignment heuristic for vehicle routing / M. Fisher, R. Jaikumar // Networks. — 1981. — Vol. 11. — № 2. — Pp. 109–124.
9. Gillett B. E. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem / B. E. Gillett, L. R. Miller // Operations Research. — 1974. — Vol. 22. — № 2. — Pp. 340–349.
10. Beasley J. E. Route-first-cluster-second methods for vehicle routing / J. E. Beasley // Omega. — 1983. — Vol. 11. — № 4. — Pp. 403–408.
11. Haimovich M. Bounds and Heuristics for Capacitated Routing Problems / M. Haimovich, A. H. G. Rinnooy Kan // Mathematics of Operations Research. — 1985. — Vol. 10. — № 4. — Pp. 527–542.
12. Toth P. The Vehicle Routing Problem / P. Toth, D. Vigo // SIAM monographs on discrete mathematics. — 2002. — Vol. 9. — Pp. 129–154.
13. Dantzig G. Solution of a large-scale traveling-salesman problem / G. Dantzig, R. Fulkerson, S. Johnson // Journal of the operations research society of America. — 1954. — Vol. 2. — № 4. — Pp. 393–410.
14. Feo T. A. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem / T. A. Feo, M. G. C. Resende // Operations Research Letters. — 1989. — Vol. 8. — № 2. — Pp. 67–71.
15. Feo T. A. Greedy randomized adaptive search procedures / T. A. Feo, M. G. C. Resende // Journal of Global Optimization. — 1995. — Vol. 6. — № 2. — Pp. 109–133.
16. Cordeau J. F. A Guide to Vehicle Routing Heuristics / J. F. Cordeau, M. Gendreau, G. Laporte, J.-Y. Potvin, F. Semet // Journal of the Operational Research Society. — 2002. — Vol. 53. — № 5. — Pp. 512–522.
17. Glaab H. A new variant of a vehicle routing problem: lower and upper bounds / H. Glaab // European Journal of Operational Research. — 2002. — Vol. 139. — № 3. — Pp. 557–577.

VESSELS ROUTING PROBLEM WITH HETEROGENEOUS FLEET IN MARINE TRANSPORTATION COMPLEX ARCTIC ZONE OF RUSSIA

This article discusses one of the most important tasks of transport logistics-vehicle routing problem. In this paper, we propose a method for solving the actual practical application - vessels routing problem with heterogeneous fleet. To find the solution of the problem is proposed to use a two-phase algorithm. At the first stage group of vertices for each future route (clustering), the second phase - the solution of traveling salesman for each group received. In the first phase calculation algorithm is used GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure). A mathematical model of the vessels routing problem with heterogeneous fleet is divided into two subtasks, the first of which is a generalized assignment problem. The grouping of vertices and the solution of the generalized assignment problem occurs in the framework of the metaheuristics GRASP.

Keywords: vehicle routing problem, vessels routing problem with heterogeneous fleet, two-phase algorithm, GRASP.

REFERENCES

1. Christofides, N., A. Mingozzi, and P. Toth. "The vehicle routing problem." *Combinatorial Optimization* 1979: 315–338.
2. Maffioli, Francesco. "The vehicle routing problem: A book review." *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies* 1.2 (2003): 149–153.
3. Lawler, E. L., J. K. Lenstra, A. R. Kan, and D. B. Shmoys. *The traveling salesman problem: a guided tour of combinatorial optimization*. New York: Wiley, 1985.
4. Miller, Clair E., Albert W. Tucker, and Richard A. Zemlin. "Integer programming formulation of traveling salesman problems." *Journal of the ACM (JACM)* 7.4 (1960): 326–329.
5. Desrochers, Martin, and Gilbert Laporte. "Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints." *Operations Research Letters* 10.1 (1991): 27–36.
6. Clarke, G. U., and John W. Wright. "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points." *Operations research* 12.4 (1964): 568–581.
7. Osman, Ibrahim Hassan. "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem." *Annals of operations research* 41.4 (1993): 421–451.
8. Fisher, Marshall L., and Ramchandran Jaikumar. "A generalized assignment heuristic for vehicle routing." *Networks* 11.2 (1981): 109–124.
9. Gillett, Billy E., and Leland R. Miller. "A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem." *Operations research* 22.2 (1974): 340–349.
10. Beasley, John E. "Route first—cluster second methods for vehicle routing." *Omega* 11.4 (1983): 403–408.
11. Haimovich, M., and A. H. G. Rinnooy Kan. "Bounds and heuristics for capacitated routing problems." *Mathematics of operations Research* 10.4 (1985): 527–542.
12. Toth, Paolo, and Daniele Vigo. "The vehicle routing problem." *SIAM monographs on discrete mathematics* 9(2002): 129–154.
13. Dantzig, George, Ray Fulkerson, and Selmer Johnson. "Solution of a large-scale traveling-salesman problem." *Journal of the operations research society of America* 2.4 (1954): 393–410.
14. Feo, Thomas A., and Mauricio G. C. Resende. "A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem." *Operations research letters* 8.2 (1989): 67–71.
15. Feo, Thomas A., and Mauricio G. C. Resende. "Greedy randomized adaptive search procedures." *Journal of global optimization* 6.2 (1995): 109–133.
16. Cordeau, Jean-François, M. Gendreau, G. Laporte, J.-Y. Potvin, and F. Semet. "A guide to vehicle routing heuristics." *Journal of the Operational Research society* 53.5 (2002): 512–522.
17. Glaab, Holger. "A new variant of a vehicle routing problem: Lower and upper bounds." *European Journal of Operational Research* 139.3 (2002): 557–577.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Головцов Дмитрий Львович —
начальник лаборатории.
ФГАОУ ВО «ГУАП»
l6kaf@guap.ru
Научный руководитель:
Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Golovcov Dmitriy Lvovich —
chief of laboratory.
SUAI
l6kaf@guap.ru
Supervisor:
Izotov Oleg Albertovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.472; 528.475

**В. В. Волков,
А. А. Елагин,
А. Л. Демидов**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Рассмотрен вопрос использования спутниковых радионавигационных систем второго поколения для определения уровня моря. Представлены дифференциальные методы повышения точности спутниковых измерений, используемые в современной гидрографии. Отображены методы определения поправок за уровень моря, используемые производителем спутниковой радионавигационной аппаратуры — компанией Veripos. Указаны недостатки данных методов определения колебаний уровня моря. Произведена оценка точности измерений глубины согласно требованиям российских и международных стандартов, а также с учетом технических характеристик используемого для этих целей оборудования. Представлен математический алгоритм исправления эллипсоидальной высоты принимающей радионавигационной антенны при отклонении судна от состояния равновесия под воздействием внешних сил. Приведено подробное описание метода приведения исправленной высоты антенны к выбранному нулю глубин и определение поправок к измеренной глубине за уровень моря. Отмечены достоинства и недостатки данного метода, а также особенности применения при производстве гидрографических изысканий.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, эллипсоидальная высота, углы крена и дифферента, динамическое проседание, матрица поворота, нуль глубин, уровенный пост.

В СВЯЗИ с развитием спутниковых радионавигационных систем (СРНС) появилась возможность учитывать колебания уровня моря в режиме реального времени. Данный метод основан на определении высоты антенны приемника, высотная отметка которой напрямую зависит от колебаний уровня моря. При использовании дифференциального метода повышения точности спутниковых измерений КРВ (кинематика реального времени) осуществляется обсервация не только плановых координат с сантиметровой точностью, но и геодезической высоты мгновенной поверхности моря и ее приведение к выбранному нулю глубин. Однако не всегда представляется возможным использование данного метода ввиду ограничения по дальности действия (10 – 15 км) [1]. В связи с этим обстоятельством производство морских инженерных изысканий осуществляется с использованием дифференциального метода повышения точности спутниковых измерений — DGPS (*Differential Global Positioning System*), при работе с которым не всегда существует возможность приведения высоты мгновенной поверхности моря к выбранному нулю глубин, что делает необходимым определение колебаний уровня моря при помощи уровенных измерений с установкой берегового или донного уровенного поста [2].

Современные спутниковые навигационные системы позволяют определить пространственные координаты антенны: X , Y (плановые координаты) и Z (высотная координата). По данным высотной отметки антенны приемника, записанным в течение определенного временного промежутка, можно смоделировать ход уровня моря, который в дальнейшем можно привести к выбранному нулю глубин и определить поправки в глубину за уровень моря. Американской компанией «Veripos» были произведены исследования в этой области, в результате чего был создан математический алгоритм определения хода уровня моря и соответствующая опция программного обеспечения *VerifyQC*, суть которой состоит в определении колебаний уровня моря относительно двух различных систем высот посредством регистрации высоты антенны:

- *Geoid Tide* (относительно модели геоида, выбранного в соответствующем диалоговом окне);
- *Ultra Tide* (относительно среднего уровня моря, для этого необходимо как минимум 39 ч непрерывных наблюдений за уровнем моря).

Для исключения динамического проседания судна (Heave) программное обеспечение вычисляет среднее значение по всем значениям, полученным в течение заданного временного интервала (производитель рекомендует использовать десятиминутный интервал для осреднения).

Однако вследствие воздействия внешних сил нахождение судна в состоянии покоя практически исключено. В связи с этим указанный метод не учитывает углы крена и дифферента, а также мгновенного динамического проседания. Рассмотрим метод, позволяющий учитывать данные значения при определении высотной отметки антенны приемника. Для реализации данного метода необходимо использовать следующее оборудование:

- спутниковый приемник с подключенным дифференциальным сервисом;
- компенсатор качки с точностью определения углов крена и дифферента $0,1^\circ$, динамического проседания 10 см или 5 % от наибольшего значения [3];
- датчик осадки судна с точностью определения глубины водного столба 10 см;
- электронную гидрографическую информационную систему (ЭГИС) для регистрации навигационных данных в определенном формате данных (ASCII) [4];
- мареограф (для определения превышения нуля глубин над эллипсоидом).

Выполним подробное описание алгоритма исправления высоты антенны, а также ее приведение к нулю глубин и определим оценку точности измерений. Согласно требованиям Международной гидрографической организации [5] – [7] максимальная высотная неопределенность (TVU — *Total Vertical Uncertainty*) не должна превышать значения, рассчитанного по следующей формуле:

$$TVU = \pm \sqrt{a^2 + (bd)^2}, \quad (1)$$

где a — параметр, выражающий ту часть неопределенности, которая не изменяется в зависимости от глубины; b — параметр, выражающий ту часть неопределенности, которая изменяется в зависимости от глубины; d — глубина.

Параметры a и b приведены в источнике [5]. Для особой категории съёмки в районах, где глубина под килем имеет критическое значение, $a = 0,25$ м и $b = 0,0075$. Следовательно, максимальная высотная неопределенность на глубине 1 м, согласно формуле (1), равна $\pm 0,25$ м.

Согласно требованиям [8], точность измерения глубин является удовлетворительной, если выполняется равенство:

$$m_{\text{зсл}} \leq m_{\text{з0}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{з0}}$ — средняя квадратическая погрешность измерения глубин; $m_{\text{з0}}$ — допустимая погрешность измерения глубин в процентах, которая переводится в метры по формуле

$$m_{\text{з0}} = m_{\text{з0}} \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

Допустимая погрешность измерения глубин изменяется в зависимости от глубины, расчлененности рельефа дна и выбранного масштаба съёмки. Для диапазона глубин 5 – 20 м, при нерасчлененном рельефе с углами наклона до 2° и масштабе 1 : 2000, допустимая средняя квадратическая погрешность, согласно формуле (2), будет равна 31 см.

Теперь рассмотрим точность определения высотной отметки антенны при помощи спутниковых наблюдений. Остановимся на примере спутникового приёмника C-Nav 3050 с подключенными дифференциальными коррекциями SF2, компенсатором качки Kongsberg MRU5+ и датчиком осадки судна *Valeport Tide Master Portable Tide Gauge*. Согласно техническим характеристикам данных приборов, указанных производителями, суммарная погрешность исправления высоты антенны, а также её приведение к нулю глубин будет составлять ± 16 – 18 см. Однако следует учитывать погрешность измерения самой глубины. Поэтому для того, чтобы погрешность исправленной глубины удовлетворяла указанным ранее требованиям нормативных документов, необходимо наиболее точно учитывать факторы, которые могут оказать влияние на точность измерения глубины (скорость звука, измерение офсетных расстояний и др.).

Рассмотрим случай, когда под воздействием внешних сил судно отклоняется от положения равновесия на углы крена α и дифферента β , также имеет динамическое проседание H , вследствие чего изменяется высотное положение принимающей антенны спутниковой радионавигационной системы в судовой системе координат, а также её эллипсоидальная высота H_0 . На рис. 1 приведено влияние угла крена на высотное положение антенны, где H_0 — положение антенны в состоянии равновесия судна и H'_0 — положение антенны, когда судно отклонено на угол крена α .

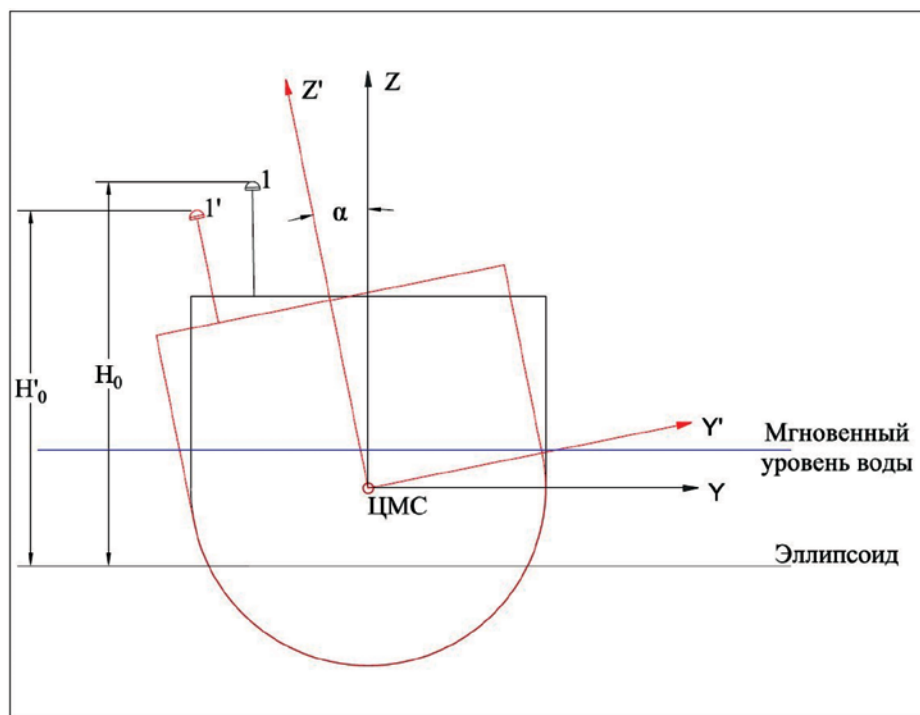


Рис. 1. Влияние крена на положение антенны

Принимающая радионавигационная антенна имеет собственные координаты в системе координат судна x, y, z . Направление осей системы координат судна приведено на рис. 2. Ось Ox направлена в нос судна и совпадает с диаметральной плоскостью судна, ось Oy направлена в правый борт, ось Oz — вверх.

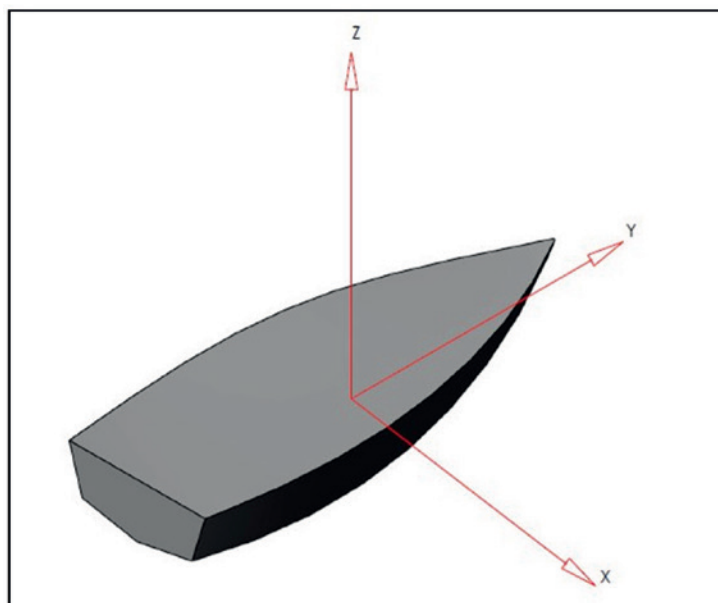


Рис. 2. Направление осей системы координат судна

При влиянии крена и дифферента происходит поворот антенны относительно осей Ox и Oy соответственно. Поворот относительно оси Oz (изменение курса судна) не оказывает влияния на высоту антенны. Поэтому для расчета исправленной высоты антенны необходимо использовать матрицу поворота в трехмерном пространстве, так как любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных (перпендикулярных) осей (в данном случае двух осей). Для определения поправок в эллипсоидальную высоту принимающей радионавигационной антенны необходимо умножить соответствующую матрицу поворота на вектор-столбец, описывающий вращаемую точку (в данном случае за вектор-столбец принимаются координаты антенны в судовой системе координат) [9].

Определение поправки в эллипсоидальную высоту антенны за угол крена Δz_k :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$x' = x \cdot 1 + y \cdot 0 + z \cdot 0 = x; \quad (5)$$

$$y' = x \cdot 0 + y \cdot \cos \alpha + z \cdot (-\sin \alpha); \quad (6)$$

$$z' = x \cdot 0 + y \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha; \quad (7)$$

$$\Delta z_k = z' - z. \quad (8)$$

Определение поправки в эллипсоидальную высоту антенны за угол дифферента:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$x' = x \cdot \cos \beta + y \cdot 0 + z \cdot \sin \beta; \quad (10)$$

$$y' = x \cdot 0 + y \cdot 1 + z \cdot 0 = y; \quad (11)$$

$$z' = x \cdot (-\sin \beta) + y \cdot 0 + z \cdot \cos \beta; \quad (12)$$

$$\Delta z_d = z' - z. \quad (13)$$

Расчет исправленной эллипсоидальной высоты принимающей спутниковой радионавигационной антенны представим в виде

$$H_{\text{и}} = H_0 \pm \Delta z_k \pm \Delta z_d \pm H. \quad (14)$$

Знак вводимых поправок зависит от знака углов крена и дифферента, а также от расположения антенны относительно центра судовой системы координат. Также необходимо учитывать величину динамического проседания судна H в данный момент времени. После того как был произведен расчет исправленной эллипсоидальной высоты антенны, необходимо рассчитать положение уровня моря относительно выбранного нуля глубин. На рис. 3 схематично отражена суть данного метода.

Для того чтобы определить положение уровня моря относительно выбранного нуля глубин, необходимо иметь датчик осадки судна, положение которого определено в судовой системе координат. Зная это, можно определить высотное расстояние между спутниковой радионавигационной антенной и датчиком осадки K . Расстояние от исправленной высоты антенны до мгновенного уровня моря [1], [10] будет равно:

$$T = K - \text{осадка}. \quad (15)$$

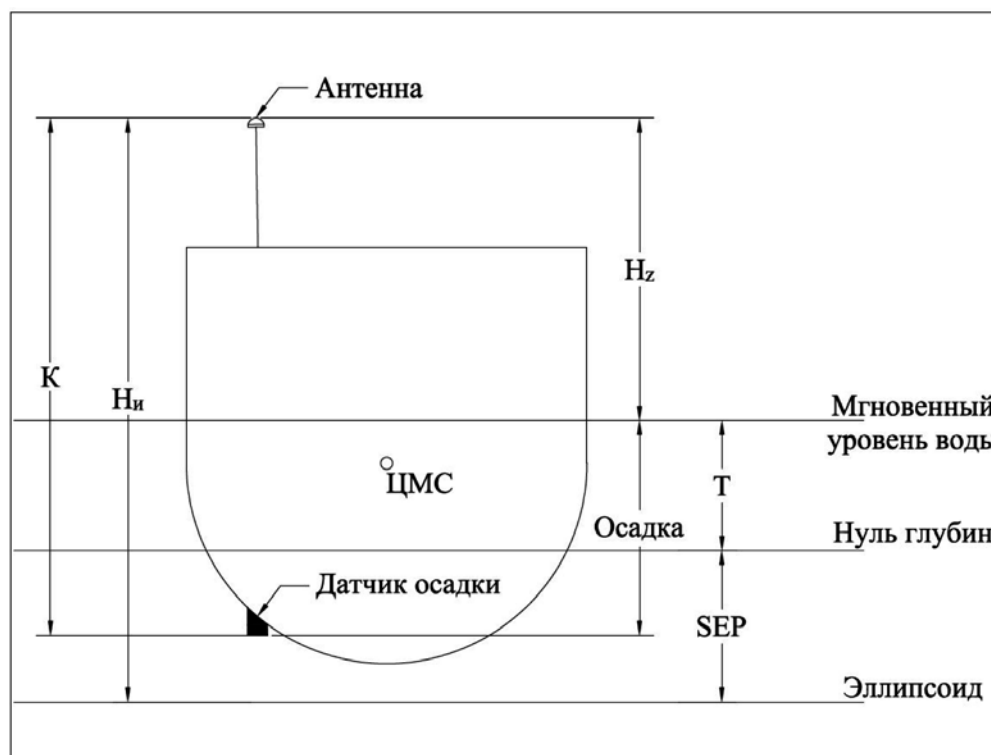


Рис. 3. Определение положения уровня моря относительно выбранного нуля глубин

Следовательно, поправка за уровень моря будет равна:

$$T = H_{и} - H_z \pm SEP, \quad (16)$$

где SEP — превышение нуля глубин над эллипсоидом.

Таким образом, согласно результатам проведенного исследования, была разработана теоретическая основа метода определения уровня моря при помощи спутниковых радионавигационных систем второго поколения. Представленный математический алгоритм расчета эллипсоидальной высоты антенны приемника, в отличие от метода, предложенного компанией «Veripos», позволяет учитывать перемещения судна, вызванные воздействием внешних сил (крен, дифферент и динамическое проседание). Кроме того, в рамках данного метода возможен переход от высоты антенны к фактическому уровню моря с последующим приведением к выбранному нулю глубин, что позволяет улучшить контроль качества батиметрических данных на первоначальной стадии обработки измерений. Однако для практической реализации данного метода необходимо использование уровенного поста для определения величины SEP (расстояние по нормали между геоидом и эллипсоидом) [11]. Ввиду непараллельности поверхностей эллипсоида и геоида (нуль глубин) данный метод будет справедлив тогда, когда известна разница между этими поверхностями. Для использования на любой акватории необходимо производить расчеты перехода с эллипсоида на геоид перед началом изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фирсов Ю. Г. Методы использования спутниковой аппаратуры, реализующей режим кинематики реального времени (RTK) для определения поправок за уровень моря / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 1. — С. 21–26.
2. Фирсов Ю. Г. Определение высоты уровня моря в геоцентрической системе с использованием высокоточного спутникового сервиса C-NAV / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов // Геодезия и картография. — 2007. — № 6. — С. 55–64.

3. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
4. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения. — М.: Изд-во «Стандартинформ», 2006. — 71 с.
5. IHO Standards for Hydrographic Surveys (5th Edition). — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 с.
6. Фирсов Ю. Г. Пятая редакция международного стандарта на гидрографические съемки S-44 Международной гидрографической организации / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 1 (51). — С. 39–44.
7. Нестеров Н. А. О допустимой величине погрешности местоположения глубины при выполнении детальной съемки / Н. А. Нестеров // Навигация и гидрография. — 2013. — № 35. — С. 53–58.
8. СП 11-114-2004. «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений». — М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004.
9. Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики / В. Ф. Журавлев. — М.: Физматлит, 2001. — 319 с.
10. Sander P. RTK tide basic//HYDRO International. — 2003. — Vol. 7. — № 10. — Pp. 26–29.
11. РД 31.74.04-2002. «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним». — М., 2002. — 88 с.

SEA LEVEL DETERMINATION BY GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

The study examines usage of Global Satellite Systems for sea level determination. The modern differential method of accuracy increasing are presented. The methods of sea level correction determination used by manufacturer of GNSS equipment are presented. Estimated accuracy of depth measurements is performed in accordance with Russian and International Standards requirements and technical characteristics of equipment used. The mathematical algorithm of antenna ellipsoid height correction due to attitude influence is described. Reduction of corrected antenna height to chart datum and determination of sea level correction are described. Advantages and disadvantages are noted.

Keywords: Global Satellite Navigation Systems, ellipsoid height, angles of roll and pitch, heave, rotation matrix, chart datum, tide gauge.

REFERENCES

1. Firsov, Yuriy Georgievich. "Metody ispolzovaniya sputnikovoi apparatury, realizuiushchei rezhim kinematiki realnogo vremeni (RTK) dlia opredeleniya popravok za uroven moria." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2007): 21-26.
2. Firsov, Yuriy Georgievich, and M. V. Ivanov. "Definition of sea level altitude in geocentric system using C-NAV high-accuracy satellite service." *Geodesy and Cartography* 6 (2007): 55-64.
3. Firsov, Yuriy Georgievich. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov*. SPb: Nestor-istoriya, 2010.
4. Russian Federation. State Standard GOST R 52438-2005. *Geograficheskie informatsionnye sistemy. Terminy i opredeleniya*. M.: Standartinform, 2006.
5. *IHO standards for hydrographic surveys*. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
6. Firsov, Yuriy Georgievich. "5th edition of the International standard for hydrographic mapping S-44 of the International Hydrographic Organization (based on the materials from foreign sources)." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2008): 39-44.
7. Nesterov, N.A. "O dopustimoi velichine pogreshnosti mestopolozeniya glubiny pri vypolnenii detalnoi semki." *Navigatsiya i gidrografiya* 35 (2013): 53-58.
8. Russian Federation. Set of regulations SP 11-114-2004. *Inzhenernye izyskaniya na kontinentalnom shelfe dlia stroitelstva morskikh neftegazopromyslovykh sooryzheniy*. M.: FGUP PNIIS (Glavstroii Rossii), 2004.
9. Zhyravlev, Viktor Fillipovich. *Osnovy teoreticheskoy mahaniki*. M.: Fizmalit, 2001.
10. Sanders P. "RTK tide basic." *HYDRO International* 7.10 (2003): 26-29.
11. Russian Federation. Regulatory Document RD 31.74.04-200. *Tehnologiya promernykh rabot pri proizvodstve dnouglubitelnykh rabot i pri kontrole glubin dlia bezopasnosti plavaniya sudov v morskikh portakh i na podhodakh k nim*. M., 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волков Виталий Владимирович — инженер-гидрограф.
ЗАО «РОМОНА»
volkovvv1982@mail.ru
Елагин Антон Анатольевич — аспирант.
Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
elagintony@gmail.com
Демидов Александр Леонидович — аспирант.
Научный руководитель:
Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
alexandrдемидов@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volkov Vitaliy Vladimirovich — hydrographic surveyor.
ROMONA Inc.
volkovvv1982@mail.ru
Elagin Anton Anatolievich — postgraduate.
Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich — Dr. of Technical science, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
elagintony@gmail.com
Demidov Aleksandr Leonidovich — postgraduate.
Supervisor:
Shmatkov Vladimir Antonovich — Dr. of Technical science, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
alexandrдемидов@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2015.

УДК 551.4

**Д. М. Белов,
Н. И. Дорошенко**

**ОСНОВЫ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ МОРФОДИНАМИКОЙ
БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ**

Приведены теоретические основы управления объектами неживой природы, в том числе береговой зоны, базирующиеся на определении главных целей, которые должны достигаться в результате обозначенного процесса. Чаще всего одной из основных целей является восстановление равновесного состояния морфодинамической системы, которое достигается корректировкой контрольных параметров, описывающих её существующее состояние. Приведены определения основных используемых в настоящей статье терминов. Изложены основные положения математического моделирования динамики береговой зоны моря, представлена схема такой модели и указаны участки береговых зон различных морей, на которых эта математическая модель применялась. Показаны примеры её удачного использования для управления морфодинамическими системами в береговой зоне Финского залива в районе пос. Нарва-Йыэсуу (Эстонская республика), включая использование искусственного гидротехнического сооружения — подводного песчаного рифа для подпитки восстанавливаемого пляжа и формирование авандюны с помощью металлической трубы большого диаметра.

Ключевые слова: береговая зона моря, управление процессами и объектами, реформирование, морфодинамика.



НАСТОЯЩАЯ статья посвящена вопросу защиты и восстановления морских побережий от негативного воздействия на него как природных процессов, так и антропогенного воздействия. Данная тема является особенно актуальной для побережья Финского залива в границах Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга. Это, прежде всего, связано с большим объёмом строительства (как гидротехнического, обусловленного строительством портовых ком-

плексов, так и рекреационного, определённого обустройством береговой зоны под места летнего отдыха для граждан). В связи с этим, для выявления причин таких воздействий и ликвидации их отрицательных последствий, нами предлагается использование методики управления морфодинамическими процессами в береговой зоне. Её применение планируется на юго-восточном побережье Финского залива в границах Ломоносовского района Ленинградской области. Также в работе приводятся данные натурных исследований, выполненных в 2015 г., которые позволили определить начальное состояние береговой зоны (до осуществления управляющих воздействий на указанный участок побережья). Проведенные исследования являются актуальными и с сугубо практической целью — ликвидацией угрозы разрушения участка автомобильной дороги, соединяющего г. Санкт-Петербург с ЛАЭС.

Как следует из общей теории управления, при её осуществлении возможна постановка двух основных задач:

- управление непосредственно самим объектом в процессе его функционирования;
- управление объектом без непосредственного вмешательства в процесс, так называемое *самоуправление*.

Чтобы добиться положительного, т. е. желаемого в процессе управления результата, необходимыми являются следующие условия, представляющие собой определённый объем информации.

Во-первых, это набор достаточных целей управления или, иначе, перечень того, чего мы хотим добиться в результате управления объектом. Поскольку таких целей может быть несколько, то их порядок определяется по их значимости.

Во-вторых, перечень текущего, или, если такового нет, то прогнозируемого состояния контрольных параметров, описывающих реальное поведение объекта на пути достижения поставленной цели.

В ходе осуществления процесса управления появляется информация о существующих погрешностях управления, т. е. список не достигнутых по тем или иным причинам каких-либо ранее заданных целей. Это даёт возможность в ходе управления вносить необходимые коррективы и добиваться повышения качества управления. Кроме того, комплект выявленных ошибок является основой для формирования оценки качества управления.

Сопоставление информации о состоянии объекта с целями управления им позволяет определить и осуществить необходимое управляющее действие. Затем для осуществления дальнейшего управления объектом находятся дополнительные параметры, описывающие состояние объекта, окружающей среды и т. д. Указанные параметры можно разделить следующим образом:

- *управляемые*, которые можно скорректировать воздействием со стороны субъекта управления, что повлечёт за собой изменение контрольных параметров;
- *свободные*, которые изменяются при трансформации управляемых параметров, входящих отдельной группой в состав целей управления.

При этом необходимо отметить, что в изменении управляемых параметров выражается управляющее воздействие, которое составляет обособленную часть процесса управления объектом.

Методика управления морфодинамическими процессами в береговой зоне моря основана на следующих положениях. При анализе состояния береговой зоны наиболее правильным и рациональным является применение системного подхода, основанного на выделении в упомянутой зоне определённых организационных структур — морфодинамических систем [1]. Такие системы могут быть как *открытыми*, т. е. связанными между собой вдольбереговыми потоками наносов, так и *закрытыми*, не имеющими такой связи. Процесс управления в этом случае обычно заключается в восстановлении состояния равновесия в береговой зоне. Это можно объяснить тем, что негативные воздействия на неё [2], проявляющиеся в переформировании различных частей такой зоны, связаны с нарушением её устойчивости.

Добиться восстановления зоны в целом или её различных частей можно лишь зная закономерности развития побережий. Для осуществления управления динамикой береговых зон необходимо, прежде всего, выделение в них локальных морфодинамических систем, для чего проводит-

ся их детальное обследование, результатом которого является определение состояния береговой зоны и её разделение на морфодинамические системы [3]. Определив начальное состояние побережья и локализацию негативного воздействия на неё (т. е. в каких локальных морфодинамических системах произошли наибольшие переформирования), затем можно приступить к установлению причин происшедшего и, в дальнейшем, к ликвидации его последствий. Управление в данном случае осуществляется с помощью математической модели динамики береговой зоны. Зная начальное состояние этой зоны и динамику её развития на модели, можно получать промежуточные состояния зоны и корректировать ход процесса управления. Это во многом позволит сэкономить время и трудозатраты при достижении положительного результата.

При переходе непосредственно к вопросу управления морскими береговыми морфодинамическими системами нужно иметь в виду, что под изменениями в береговой зоне понимаются нарушения в строении её надводной и подводной части, происходящие под воздействием как природных, так и антропогенных факторов, одним из которых может быть загрязнение вод [4]. В рамках временных масштабов хозяйственной деятельности в этой зоне можно с достаточной долей уверенности считать доминирующими в данном процессе гидродинамические воздействия [5], [6]. Другим по значимости фактором, приводящим к значительным переформированиям в береговой зоне моря, является осуществляемая здесь хозяйственная деятельность [7], [8].

Следует отметить, что надводные и подводные изменения рельефа неотделимы от перемещения наносов, баланс которых гарантирует пространственно-временную устойчивость систем [9]. Перемещение наносов следует в данной трактовке рассматривать как одну из сторон выражения процесса переформирования, а морфологические изменения рельефа — как его внешнее проявление. Известно, что по форме перемещения отдельной твёрдой частицы наносы делятся на *влекомые*, которые являются более крупными из имеющихся в потоке, и *взвешенные* в нём. Причём первые можно охарактеризовать как основные, формирующие прибойную часть рельефа береговой зоны. Образующие в береговой зоне водные потоки обладают способностью в широких пределах изменять свою транспортирующую способность в зависимости от режима, количества и состава поступающих в них наносов [10], [11]. Это достигается морфодинамическими преобразованиями в береговой зоне, а также изменением состава донных отложений. Кинематическая структура скоростного поля водных потоков, так же, как и морфология береговой зоны, имеет четко выраженный дискретный характер. Эта дискретность выражается в образовании целостных морфодинамических систем, которые состоят из структурных элементов меньшего размера и иного строения (например, участков берегов различных видов и типов).

Исходя из ранее изложенного, можно предложить следующую схему управления морфодинамическими процессами в береговой зоне моря. На начальном (первом) этапе, в ходе проведения натурных исследований в изучаемой береговой зоне, выделяются локальные морфодинамические системы, двух типов: *открытые* и *закрытые*. В качестве примера приведём береговую зону, расположенную в южной части Финского залива от м. Шепелево до побережья в районе пос. Малая Ижора, где было выделено пять участков береговой зоны, представляющих собой открытые локальные взаимосвязанные морфодинамические системы (рис. 1):

- бухтовый участок (м. Шепелево — м. Серая лошадь);
- участок открытых бухт (м. Серая лошадь — м. Малый);
- выровненный участок с имеющимися открытыми бухтами (м. Малый — устье р. Лебяжья);
- выровненный участок (устье р. Лебяжья — устье р. Ижора);
- выровненный участок (устье р. Ижора — 51-й км автодороги г. Санкт-Петербург — пос. им. Первого Мая).

После выделения морфодинамических систем можно приступить к определению наиболее уязвимых их частей. После того как определены основные количественные и качественные характеристики системы и степень её повреждения (по сравнению с состоянием этой системы до воздействия на неё), необходимо установить основные цели управления ею, которыми могут являться восстановление системы до равновесного состояния, ликвидация отрицательных воз-

действий на неё со стороны хозяйственной деятельности человека и созданной им соответствующей структуры и др.

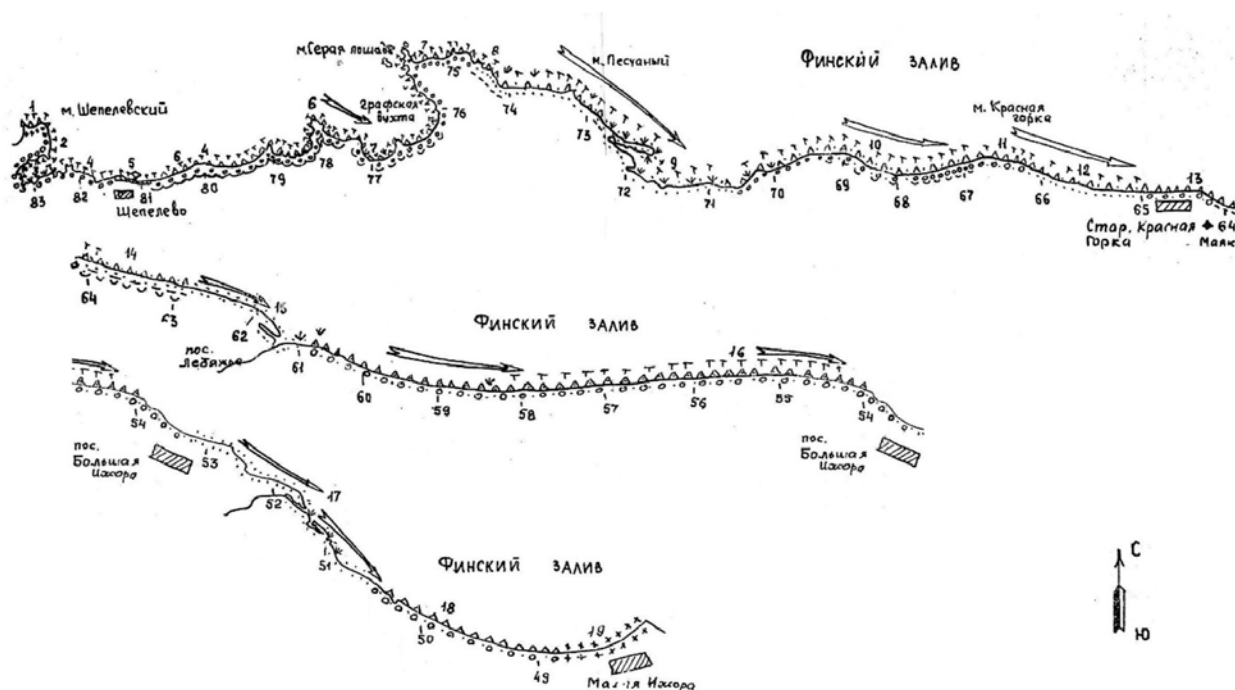


Рис. 1. Морфодинамическая карта берегов Финского залива (м. Шепелево — Старая Красная горка — Малая Ижора):

- 1 — абразионный берег, укрепленный бетонной стенкой, отмель валунная;
- 2 — низкий слабо размываемый берег, сложенный песком с валунной отмосткой;
- 3 — низкий зарастающий берег с валунами на отмели; 4 — низкий неразмываемый берег с валунной отмосткой;
- 5 — берег, укрепленный бетонной стенкой ($H = 1,6$ м в 10 м от уреза);
- 6 — абразионный бухтовый (с валунными мысами) песчаный берег с валунами на отмели;
- 7 — абразионный низкий (абразионный уступ 0,7 – 1,2) песчаный берег с валунами на отмели и валунной «отмосткой»;
- 8 — деградирующий аккумулятивный участок с сохранившейся авандюной (0,5 – 0,8 м, ширина 15 – 20 м);
- 9 — низкий аккумулятивный, песчаный, зарастающий берег (на 350 – 400 м камыши и осока);
- 10 — абразионный, песчаный берег (1,8 – 2,0 м) с песчаным пляжем (25 – 26 м);
- 11 — абразионный высокий (до 20 – 22 м) берег, сложенный песчаными и валунными отложениями с валунным пляжем (10 – 11 м);
- 12 — деградирующий аккумулятивный, песчаный берег с сохранившейся авандюной (до 20 м);
- 13 — высокий абразионный обвально-осыпной берег, сложенный песком с валунами. Бенч, покрытый валунами;
- 14 — деградирующий аккумулятивный берег с сохранившейся авандюной (до 1,5 м высотой и до 8 – 9 м шириной);
- 15 — аккумулятивный берег с песчаным пляжем (до 50 – 60 м);
- 16 — абразионный, песчаный обвально-осыпной берег с песчаным пляжем (20 – 22 м) и валунами на отмели;
- 17 — аккумулятивный берег с песчаным пляжем (50 – 60 м) на значительном участке зарастающий;
- 18 — абразионный низкий берег (размыты в последние 3 года 5 – 6 м);
- 19 — низкий берег, укрепленный каменной наброской (3,5 – 4,0 м³/м)

На следующем (втором) этапе управления необходимо определить то состояние, к которому необходимо привести систему. Это можно осуществить, используя принцип аналогий морфодинамических процессов в схожих природных условиях. Задать промежуточные контрольные состояния можно с помощью математических моделей береговой зоны моря, описывающих с достаточной степенью достоверности происходящие в ней природные процессы. Для этого в работе предлагается использовать многократно применённую авторами математическую модель морфодинамики береговой зоны водоёмов [3]. Эта модель была с успехом применена для моделирования морфодинамических процессов в береговых зонах, расположенных в Балтийском, Белом и Каспийском море. С её помощью можно определять промежуточные контрольные состояния

береговой зоны при осуществлении управляющего воздействия, а также моделировать такое воздействие при изменении значений управляемых параметров [12].

Предлагаемая математическая модель переформирования береговой зоны представляет собой комплекс расчётных блоков, вычисляющих различные природные процессы, происходящие в береговой зоне (рис. 2). Первые два блока содержат информационную базу для последующих расчётов, пятый и шестой блоки также информационные, а остальные четыре — программы для вычисления параметров гидравлических и морфодинамических процессов. Расчёт указанных процессов выполняется по плановой схеме участка, позволяя моделировать процессы переформирования как в рамках целостной морфодинамической системы, так и отдельных её частей, интересующих исследователя. Такой переход возможен, например, при использовании метода телескопирования. Расчётная схема рассматриваемой модели основана на следующей системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \frac{1}{H_0} \left\{ \frac{\partial (H_0, \rho_n, u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (H_0, \rho_n, u_y)}{\partial y} \right\} = \frac{\rho_n}{L^* H_0} (T_{sc} - T_s); \\ H_1 = \frac{u^2}{\delta_0 c_{sh}^2} - \frac{w_0 u}{\delta_0 \sqrt{g c_{sh}}} + d_0; \\ g \rho_0 (u_x - u_{1x}) \sqrt{u_x^2 - u_{1x}^2} - g (\rho_{1n} - \rho_0) H_1 f_{OK} \frac{u_{1x}}{\sqrt{u_1}} \cos \alpha_x - g H_1 \rho_{1n} \frac{\partial f_{OK}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial t} = - \frac{1}{2 - m_r} \frac{\partial H_1}{\partial t} - \frac{1}{2 - m_r} \frac{\partial}{\partial x} (H_1 - u_{1x}) - \frac{1}{2 - m_r} \frac{\partial}{\partial y} (H_1 - u_{1y}) + \frac{T_s - T_{sc}}{(2 - m_r) L^*} \end{array} \right.$$

где ρ_n — плотность потока наносов; H_0 — толщина потока; u_x, u_y — составляющие скорости потока; L^* — характеристическая длина; T_{sc} — транспортирующая способность потока; T_s — перемещаемая потоком масса наносов; ρ_0 — концентрация частиц в потоке; f_{OK} — тангенс угла внутреннего трения частиц грунта; m_r — коэффициент пористости грунта; δ_0 — относительный объемный вес наносов; H_1 — толщина придонного слоя; α — угол подхода волн к берегу.

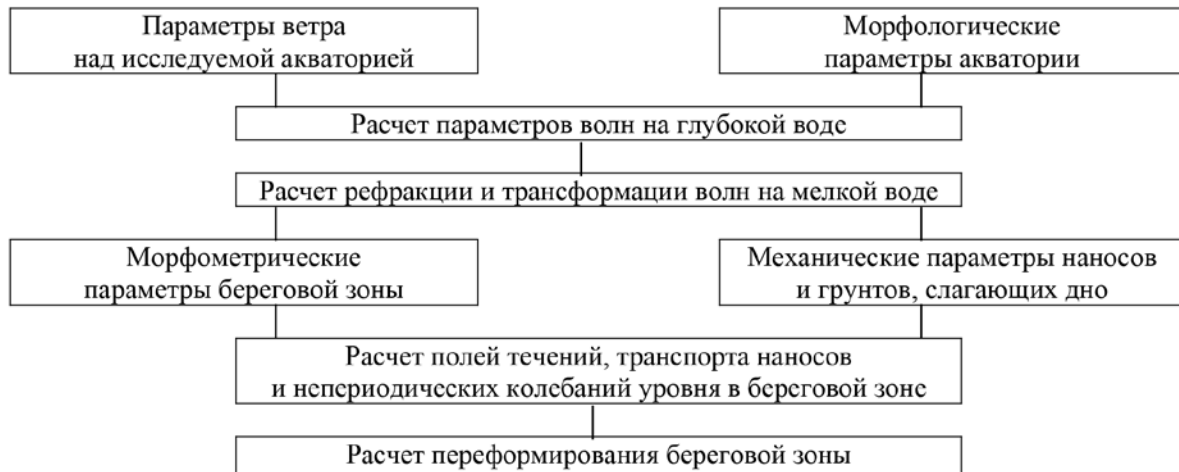


Рис. 2. Схема математической модели переформирования береговой зоны

По функциональному назначению все файлы математической модели можно разделить на четыре группы:

- файлы ввода данных;
- расчётные (основные) файлы;
- буферные файлы для передачи данных;
- файлы вывода данных.

Структура пакета прикладных программ выглядит следующим образом.

Программа ввода данных о ветровых и волновых характеристиках на расчётной акватории. Данная программа позволяет в результате вычислений создать файл данных, являющийся входным для программы расчёта параметров волн на глубокой воде. В результате нахождения этих параметров для заданных исходных данных создаются два файла, один из которых содержит результаты расчётов в виде таблиц выходной формы, а второй — исходные данные для следующей программы, по которой осуществляется расчёт трансформации ветровых волн на береговом откосе. Для данного расчёта необходим файл данных о цифровой модели рельефа дна расчётной области береговой зоны, формируемый отдельной программой ввода данных. Результатом работы программы расчёта трансформации волн на береговом откосе являются файлы, в которых содержатся метки узлов расчётной сетки и рассчитанные параметры волн на линии первого обрушения. Результаты расчётов выдаются в виде таблиц.

Специальная программа, корректирующая данные файла, содержащего метки узлов исходного рельефа дна. Программа используется для ввода данных об имеющихся или проектируемых сооружениях. В результате появляется новый файл, содержащий метки, соответствующие конфигурации гидротехнических или иных сооружений, расположенных в границах расчётной зоны.

Программа, определяющая плановую картину и параметры вдольбереговых течений. Заключительная программа пакета вычисляет расходы взвешенных и влекомых наносов и рассчитывает новые значения глубин на заранее назначенных временных отрезках, т. е. изменение рельефа подводного берегового откоса в течение определённого промежутка времени в результате воздействия гидродинамических процессов [13].

В июле 2015 г. было проведено маршрутное обследование указанных ранее участков береговой зоны южного побережья восточной части Финского залива. В результате были зафиксированы изменения, произошедшие на них за прошедшие 25 лет, а именно на участках 9 – 10 (см. рис. 1) в районе м. Малый наблюдаются обнажённые корни деревьев и валуны на ярко выраженном береговом уступе, видны смытые остатки узкого песчаного пляжа. Его ширина сейчас составляет не более 7 – 10 м. Подмыто бетонное основание существующего берегозащитного сооружения. Превалирующее направление вдольберегового течения — северо-западное. Обнажены глины — моренный слой. Абразия усугубилась, исчез песчаный пляж. Размыв характеризует пятиметровый уступ. Прибрежная зона заросла камышом и осокой. Судя по проплешинам в росте осоки, происходит деградация береговой отмели (рис. 3).



Рис. 3. Фотография участка берега м. Малый

На 50 м восточнее наблюдаются остатки пляжа, видны следы деградации и интенсивное обрушение берегового уступа высотой 2,20 – 2,50 м. Обнажены инженерные коммуникации (кабель подземный), идет оползание дерна. По урезу наблюдается валунная отмостка, ширина пляжа, сложенного преимущественно крупнозернистым песком, составляет примерно 17 – 20 м. Да-

лее в сторону м. Красная горка наблюдается переход берега в бухтовый тип. За счет перемещённых сюда наносов в кутовой части бухты образовался широкий пляж, ширина которого составляет 20 – 30 м. Он сложен песком средней крупности (0,20 – 0,25 мм).

а)



б)



Рис. 4. Фотографии берега на участке 11 – 12:
а — клиф, заросший растительностью; б — абразионный клиф

Участок 11 – 12 (см. рис. 1). Абразионный берег с каменной валунной отмосткой, состоящей из крупных и средних валунов. Ширина пляжа от уступа до уреза составляет 15 – 20 м. Далее к востоку идёт каменная отмостка, наблюдается сужение пляжа со стабилизацией откоса. Продолжением этого участка является высокий абразионный клиф, местами густо заросший растительностью (рис. 4, а, б). Причиной абразии являются различные природные процессы, в том числе дефляционные (выдувание и развеивание ветром рыхлого материала, слагающего берег), а также антропогенные разрушения, вызванные вытаптыванием пляжа и авантюны людьми и т. п. [14].

Участок 12 – 13 (см. рис. 1). Аккумулятивный песчаный берег с устойчивой авантюной, сложенный более крупным песком. Высота авантюны составляет около 3 м. Пляж сложен из крупнозернистого песка красноватого цвета. Вдоль уреза воды идёт береговой вал из мелкой гальки 5 – 12 мм. Пляж шириной 20 – 25 м стабилен за счёт имеющихся здесь дюны и берегового вала (рис. 5, а).

Пирс рыболовецкого колхоза демонтирован, к востоку от него осталось несколько сооружений со следами берегоукрепления (рис. 5, б). Продолжает этот участок высокий абразионный обвально-осыпной берег, сложенный песком с валунами. Имеется также бенч, покрытый ими.

а)



б)



Рис. 5. Фотографии участка 12 – 13: а — пляж с устойчивой авантюной;
б — несколько сооружений пирса рыболовецкого колхоза со следами берегоукрепления
(участок берега 12 – 13)

Участок 13 – 14 (см. рис. 1). По составу песка можно определить, что пополнение пляжа ведётся за счёт основания размываемого откоса. Участки пляжа, закреплённые за домовладениями на побережье, укреплены габионами и поперечными берегозащитными сооружениями из них. Далее в сторону пос. Б. Ижора идёт заанкеренная шпунтовая стенка с засыпкой. Визуальный анализ

снимков Google earth, за 20 августа 2005 г. (рис. 6, а) и 7 июля 2014 г. (рис. 6, б), показывает, что при помощи такого укрепления хозяева участков увеличили их площадь, перекрыв поток наносов на далее расположенном участке пляжа. Далее расположен транзитный участок береговой зоны, представляющий пляж шириной 7 – 10 м. В 600 м восточнее укрепленного берега происходит разрушение основания авантюны, что свидетельствует о его деградации.



Рис. 6. Космические снимки: а — от 20.08.2005 г.; б — от 7.07.2014 г.

Участок 14 (см. рис. 1). На нём заметны следы, идущего здесь процесса абразии, сопровождающегося разрушением коренной дюны (рис. 7, а). Ширина пляжа на отдельных участках составляет 5 – 7 м, замечен выход на поверхность синих моренных глин с валунными включениями (рис. 7, б). Ощущается явная нехватка пляжеобразующего материала.

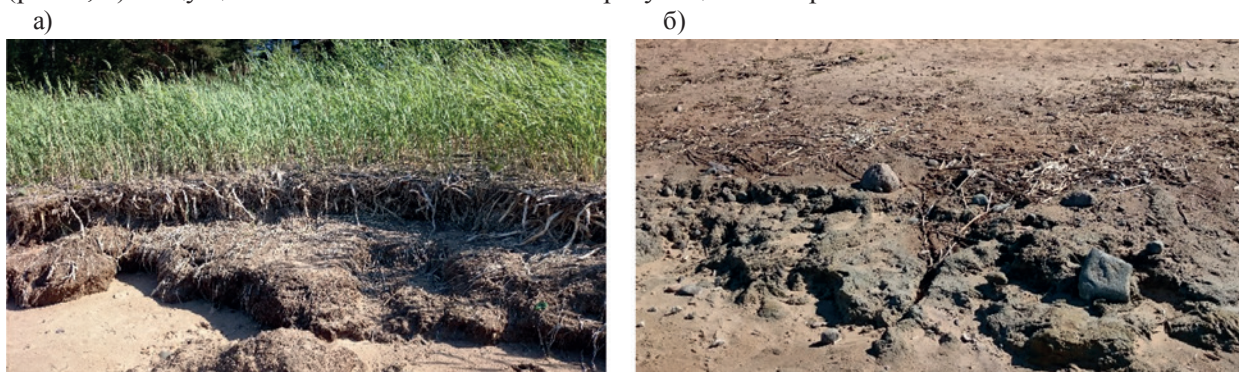


Рис. 7. Фотографии участка 14: а — разрушение коренной дюны; б — выход на поверхность моренных глин с валунными включениями

За счет намывного пляжа система бухты разбита на две части. Поток наносов песка перекрыт на 58 км (рис. 8 – 10).



Рис. 8. Космические снимки от 20.08.2005 г.: а — участок пляжа до намыва; б — участок дороги А-121 (г. Санкт-Петербург — пос. Сосновый Бор)



Рис. 9. Космические снимки от 16.08.2010: а — участок пляжа после намыва;
б — участок дороги А-121 (г. Санкт-Петербург — пос. Сосновый Бор)



Рис. 10. Космические снимки от 07.07.2014: а — участок пляжа после намыва;
б — участок дороги А-121 (г. Санкт-Петербург — пос. Сосновый Бор)

Управление морфодинамическими процессами в береговой зоне моря можно осуществлять различными методами: *структурным* и *бесструктурным*. При использовании структурного метода управляющее воздействие осуществляется адресно, через специально сформированные или уже имеющиеся элементы структуры объекта. При использовании бесструктурного метода упомянутых ранее элементов структур нет и выполняется безадресное воздействие, приводящее к порождению подобных структур в береговой зоне в ходе существующих там естественных процессов.

Рассмотрим применение ранее изложенного в ситуациях, имеющих место в береговых зонах. Из двух указанных методов чаще применяется структурный. К нему можно отнести создание искусственных подводных отвалов песка в береговой зоне в районе разрушаемого надводного берегового откоса. Суть этого приёма состоит в следующем. В береговой зоне моря, вблизи переформируемого берегового откоса, создаётся необходимый подводный запас песчаного или галечного материала (в зависимости от материала, из которого состоит такой откос или пляж) путём организации концентрированного его отвала земснарядом посредством перекачки материала по пульпопроводу либо с помощью наземных транспортных средств и самоотвозных барж.

Одним из вариантов данного метода является создание на подводном песчаном береговом откосе искусственного песчаного рифа. Примером реализации этого подхода является воссоздание искусственного песчаного пляжа посредством намыва такого сооружения в подводной части береговой зоны на эстонском побережье Нарвского залива в районе пос. Нарва-Йыэсуу в конце 80-х гг. XX в. В результате проведённых мероприятий деградирующий участок побережья Нарвского залива протяжённостью около 7 км был надёжно защищён от разрушения. С помощью управления морфодинамическими процессами на нём был организован искусственный песчаный пляж за счёт

создания условий для развития желаемых естественных процессов в береговой зоне, который существует и ныне почти в неизменном виде.

Причинами достижения положительного результата явилось наличие нескольких факторов. Первым из них следует считать создание искусственного песчаного рифа на подводном береговом откосе. Вторым фактором явилось усиление внешней восточной границы локальной морфодинамической системы в районе пос. Нарва-Йыэсуу в Эстонии, которое было достигнуто путём возведения ограждающего мола в устье р. Нарова. С одной стороны, мол оградил реку от проникновения в неё наносов со стороны эстонского участка береговой зоны, а с другой — явился одним из элементов инженерной защиты восстанавливаемого пляжа. Третий фактор — это намыв на участке деградирующего пляжа, соседствующего с транзитным участком береговой зоны, фрагмента экспериментального пляжа прислонённого типа с искусственной авандюной. Материалом для намыва явился песчаный грунт, взятый с приустьевого песчаного бара. Этот фрагмент пляжа в некотором роде спровоцировал восстановление деградирующего участка. Четвёртым фактором явились оставленные перед авандюной стальные трубы пульпопровода, идущие от фрагмента экспериментального пляжа до ограждающего мола в устье реки, т. е. практически через весь деградирующий (размываемый) участок пляжа, которые послужили основой для воссоздания коренной дюны.

В заключение следует отметить, что изложенные методы управления морфодинамическими процессами в морских береговых зонах были с успехом применены на побережьях Балтийского моря (Финский залив в районе пос. Нарва-Йыэсуу), Каспийского моря (район юго-восточного побережья у м. Челекен). В настоящее время планируется использовать предложенный метод для управления береговыми процессами на юго-восточном побережье Финского залива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Д. М. Основные положения теории морфодинамических систем береговой зоны моря / Д. М. Белов. — СПб.: Изд-во РАН. Русское географическое общество, 1994. — 56 с.
2. Белов Д. М. Оценка воздействия на окружающую среду / Д. М. Белов. — СПб.: ФГБОУ ВПО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2013. — 206 с.
3. Белов Д. М. Проблемы морфодинамики береговой зоны моря и водоемов / Д. М. Белов // Водные пути и русловые процессы: сб. науч. тр. — СПб.: ФБОУ ВПО СПбГУВК, 2012. — С. 204–209.
4. Дорошенко Н. И. Повышение эффективности седиментационной очистки ливневых сточных вод от железа / Н. И. Дорошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 69–74.
5. Рычагов Г. И. Общая геоморфология / Г. И. Рычагов. — М.: Изд-во МГУ, 2006. — 416 с.
6. Звонкова Т. В. Прикладная геоморфология / Т. В. Звонкова. — Рипол Классик, 2013.
7. Бредис О. А. Геоэкологическая оценка побережья Финского залива в пределах Курортного района Санкт-Петербурга / О. А. Бредис // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2012. — № 147. — С. 117–124.
8. Бредис О. А. Морфодинамическое районирование и типизация берегов восточной части Финского залива в пределах Курортного района Санкт-Петербурга / О. А. Бредис // Геоэкологические проблемы современности: Доклады 3-й Международной конференции. — Владимир: Изд-во ВГГУ, 2010. — С. 51–53.
9. Демьяненко С. Г. Проблемы планирования развития морской береговой зоны / С. Г. Демьяненко, В. И. Золотов // Экономика: реалии времени. — 2012. — № 1 (2). — С. 107–113.
10. Сухинов А. И. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежных водных системах на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко // Вычислительные методы и программирование. — 2014. — Т. 15. — № 4. — С. 610–620.
11. Заковоротнова Е. Е. Описание некоторых параметров многомерной математической модели транспорта наносов в прибрежной зоне моря / Е. Е. Заковоротнова // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2010. — № 6 (107). — С. 258–259.

12. Выхованец Г. В. Динамическая устойчивость размеров песчаных пляжей в береговой зоне Черного моря / Г. В. Выхованец, А. Б. Муркалов, А. А. Стоян // Вісник Одеського Національного Університету. Географічні Та Геологічні Науки. — 2014. — Т. 19. — № 1 (20). — С. 53–68.

13. Богданов Н. А. Экохимическая геоморфология — новое направление в науке о рельефе / Н. А. Богданов // Астраханский вестник экологического образования. — 2015. — № 2 (32). — С. 36–53.

14. Голубев Д. А. Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива по отношению к механическим воздействиям от подводных горно-технических работ / Д. А. Голубев, В. Б. Погребов, М. Б. Шилин // Инженерные изыскания. — 2010. — № 9. — С. 34–43.

THE BASIC METHODOLOGY MORPHODYNAMICAL OF THE COASTAL ZONE MANAGEMENT

The article presents the theoretical bases of management of objects of inanimate nature, including Bere-traction zone, based on the definition of the main objectives to be achieved as a result of a designated process. Most often, one of the main objectives is to restore equilibrium morphodynamic system, which is achieved by adjusting the control parameters describing its existing condition. Give a definition of commonly used terms in this article. The main provisions of the mathematical modeling of the dynamics of the coastal zone of the sea, is a diagram of a model and indicates various areas of coastal zones of the seas, on which the mathematical model apply. Showing examples of its successful use to control the morphodynamic systems in the coastal zone of the Gulf of Finland near the village of Narva-Jõesuu (Estonia) Republic, including the use of artificial hydraulic structure - the sand underwater reef to feed the restored beach and foredune ridge formation with metal pipes of large diameter.

Keywords: the coastal zone of the sea, management processes and objects, reformation, morphodynamics.

REFERENCES

1. Belov, D. M. *Osnovnye polozheniya teorii morfodinamicheskikh sistem beregovoy zony morja*. SPb.: Izd-vo RAN. Russkoe geograficheskoe obshchestvo, 1994.

2. Belov, D. M. *Ocenka vozdejstviya na okruzhajushhuyu sredu*. SPb.: FGBOU VPO «GUMRF im. admirala S. O. Makarova», 2013.

3. Belov, D. M. “Problemy morfodinamiki beregovoy zony morja i vodoemov.” *Vodnye puti i usloviya processy: sbornik nauchnykh trudov*. SPb.: FBOU VPO SPbGUVK, 2012: 204–209

4. Doroshenko, N. I. “Improving the efficiency of sedimentation rainwater treatment of iron.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 69–74.

5. Rychagov, G. I. *Obshhaya geomorfologiya*. M.: Izd-vo MGU, 2006.

6. Zvonkova, T. V. *Prikladnaya geomorfologiya*. Ripol Klassik, 2013

7. Bredis, Olga A. “Geocological Assessment of the Gulf of Finland Coast Within the Bounds of Kurortnyi District of Saint-Petersburg.” *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Science* 147 (2012): 117–124.

8. Bredis, O. A. “Morfodinamicheskoe rajonirovanie i tipizacija beregov vostochnoj chasti Finskogo zaliva v predelakh Kurortnogo rajona Sankt-Peterburga.” *Gejekologicheskie problemy sovremennosti: Doklady 3-j Mezhdunarodnoj konferencii*. Vladimir: Izd-vo VGGU, 2010: 51–53

9. Demianenko, Svitlana G., and Viktor I. Zolotov. “Problems of planning of sea coastal zone development.” *Economy: the realities of time* 1(2) (2012): 107–113.

10. Sukhinov, A. I., A. E. Chistyakov, and E. A. Protsenko. “Sediment transport mathematical modeling in a coastal zone using multiprocessor computing systems.” *Numerical Methods and Programming* 15.4 (2014): 610–620.

11. Zakovorotnova, Ekaterina Yevgenyevna. “Description of some parameters of multidimensional mathematical model of sediment transport coastal seas.” *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 6(107) (2010): 258–259.

12. Vykhovanets, G. V., A. B. Murkalov, and A. A. Stoyan. “Dynamical steadiness of sandy beaches sizes in the black sea coastal zone.” *Odesa National University Herald. Geography and Geology* 19.1 (2014): 53–68.

13. Bogdanov, Nikolay Aleksandrovich. "Ecochemical geomorphology — the new direction of relief science." *Astrahanskij vestnik jekologicheskogo obrazovanija* 2(32) (2015): 36–53.

14. Golubev, D. A., V. B. Pogrebov, and M. B. Shilin. "Environmental vulnerability of the coastal zone of the eastern Gulf of Finland to mechanical effects of subaqueous mining engineering works." *The Engineering Surveys* 9 (2010): 34–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белов Даниил Михайлович —
доктор географических наук, профессор,
заслуженный эколог РФ.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
olt_prts@inbox.ru
Дорошенко Надежда Ивановна —
аспирант.
Научный руководитель:
Белов Даниил Михайлович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
132620@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belov Daniil Mihajlovich —
Dr. of Geographical Sciences, professor,
honored ecologist of the Russian Federation.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
olt_prts@inbox.ru
Doroshenko Nadezhda Ivanovna —
postgraduate.
Supervisor:
Belov Daniil Mihajlovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
132620@mail.ru

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 629.12.001

М. Э. Францев,
И. М. Францев

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КАЧЕСТВА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГЛИССЕРА ИЗ КОМПОЗИТОВ

В статье рассматривается способ определения суммарного пропульсивного качества гидродинамического комплекса при проектировании глиссирующего судна из композитов с использованием численных методов. Уравнение мощности-ходкости является одним из важнейших уравнений рациональной логико-математической модели оптимизации характеристик судна. Методами регрессионного анализа рассчитаны изменения величины суммарного пропульсивного качества глиссирующих судов для различных форм уравнения мощности-ходкости, включая формулу адмиралтейских коэффициентов. Для оценки работоспособности полученных результатов проектного анализа характеристик полной массы, мощности и скорости глиссирующих судов из композитов выполнен проверочный расчет характеристик мощности при заданной скорости. Расчет выполнен для ряда известных скоростных глиссирующих судов отечественной постройки, не входивших в обрабатываемые базы данных, с минимальной погрешностью. Разработано компьютерное приложение, позволяющее реализовать данный способ вычисления суммарного пропульсивного качества для глиссеров. Это компьютерное приложение дает возможность разработчику реализовать вариативную модель проектирования развездного судна из композитов, опирающуюся на использование параметрических методов и существенно упрощающую оптимизацию проектируемого судна.

Ключевые слова: глиссирующие суда из композитов, суммарное пропульсивное качество, численные методы, компьютерное приложение.

ПРИ разработке проекта нового глиссирующего судна из композитов, отличающегося от прототипа рядом характеристик, одним из центральных вопросов проектирования является расчет его ожидаемых скоростных качеств и их сравнение с аналогичными свойствами прототипа. При этом на этапе определения главных размерений и других проектных характеристик судна выполняется определение его ожидаемой скорости и установленной мощности главных двигателей, которое реализуется на базе анализа уравнения «Мощности – Ходкости». Необходимо отметить, что свойства композитов, как материала судовых корпусных конструкций, определяют специфическую конструкцию этого типа судов. Они также определяют особенное распределение их масс и объемов, параметры, характеризующие форму их корпусов и надстроек, а также различные другие аспекты их устройства, которые, в свою очередь, определяют эксплуатационные свойства этого типа судов, в том числе, их скоростные качества. Известно, что В. Л. Позднюнин предложил связать длину судна с его скоростью на основании статистических данных. По результатам обследований трехсот различных судов им предложена формула, в которую входят объемное водоизмещение, скорость и расчетная длина судна, и, таким образом установлена связь между этими величинами [1].

Уравнение «Мощности – Ходкости», позволяющее определить режим движения судна и согласовывающее его полную массу и параметры энергетической установки при заданной скорости движения является одним из важнейших уравнений рациональной логико-математической модели оптимизации характеристик судна. Одним из вариантов уравнения «Мощности – Ходкости» является уравнение определения потребной мощности для обеспечения скоростных характеристик судна, использующее величины сопротивления движению корпуса судна и его пропульсивного коэффициента. В этом уравнении полная масса выражена в неявном виде. Величина потребной мощности судна при этом определяется как

$$N = \frac{Rv}{A_1\eta}, \quad (1)$$

где N — мощность главных двигателей; R — сопротивление воды движению судна при заданной скорости; v — скорость судна; η — пропульсивный коэффициент, представляющий собой коэффициент полезного действия гидродинамического комплекса и валопровода; A_1 — коэффициент учета единообразия размерностей входящих в формулу физических величин.

Известно, что сопротивление воды движению судна определяется по результатам модельных испытаний, а на начальных этапах проекта — приближенными методами.

Расчет сопротивления движению и определение потребной мощности двигателей является одной из важнейших задач при проектировании судна. На ранних этапах проектирования, когда многие элементы судна еще не определены, используются приближенные способы определения сопротивления судна. В дальнейшем для этих целей, как правило, используются результаты модельных испытаний. Этот этап существенно удорожает проектирование судна. В настоящее время имеется достаточно большое количество результатов модельных испытаний быстроходных судов. С помощью метода Фруда они могут быть пересчитаны на натурное судно. В то же время известно, что практические вычисления по результатам проведенных испытаний в некоторых случаях приводят к принципиальным противоречиям или к существенным искажениям. Поэтому актуален поиск путей, которые бы позволили с достаточной степенью надежности прогнозировать при проектировании ожидаемые скоростные характеристики быстроходных судов, основываясь не только на уже существующих или специально полученных результатах модельных испытаний.

В данной работе, в первую очередь, рассматриваются однокорпусные суда из композиционных материалов, имеющие в качестве доминирующего режима движения — режим глиссирования. При определенных условиях эти суда могут длительно использоваться в переходном или водоизмещающем режимах, но основным расчетным режимом для них является режим глиссирования.

Буксировочное сопротивление глиссирующего корпуса в соответствии с [2]:

$$R_{\Pi} = R_{ГК} + R_{вч} + R_{возд}, \quad (2)$$

где R_{Π} — полное сопротивление движению судна; $R_{ГК}$ — сопротивление голого корпуса; $R_{вч}$ — сопротивление выступающих частей; $R_{возд}$ — воздушное сопротивление движению судна.

Методы расчета буксировочного сопротивления глиссирующего корпуса могут быть условно разделены на несколько групп:

- упрощенные формулы, формула адмиралтейских коэффициентов и подобные ей формулы;
- использование результатов испытаний систематических серий моделей корпусов;
- использование результатов испытаний схематизированных моделей (пластин, призм) [3];
- обработка результатов несвязных испытаний методами регрессионного анализа;
- пересчет с близкого прототипа;
- испытания модели в опытовом бассейне [4].

Определение величины пропульсивного коэффициента для скоростного судна с ограниченной осадкой вызывает достаточно большие технические трудности, и достоверность его определения на начальных этапах проектирования неочевидна. Также известно, что в пределах установившегося режима движения тип обводов корпуса мало влияет на сопротивление воды. Обеспечение высоких ходовых качеств, например, скоростного однокорпусного судна достигается, в первую очередь, правильным выбором его главных размерений, характеристик движительно-рулевого комплекса, оптимальным соотношением его водоизмещения и мощности главных двигателей. Поэтому представляет интерес вид уравнения «Мощности – Ходкости», в которое полная масса судна, мощность его главных двигателей и развиваемая судном скорость при развитии волнообразования входят в явном виде и связаны между собой зависимостью вида

$$N = \frac{D^m v^n}{C_{mn}}, \quad (3)$$

где N — мощность главных двигателей; D — водоизмещение судна; C_{mn} — коэффициент мощности.

Эта формула впервые была предложена В. Л. Позднюниным в 1916 г. и дает общий ориентир при функциональном анализе ходкости [1]. Одним из наиболее широко известных вариантов этой зависимости является Адмиралтейская формула:

$$N = \frac{D^{2/3} v^3}{C_a}, \quad (4)$$

где C_a — адмиралтейский коэффициент.

Известно, что для оценки изменения мощности при изменении скорости отдельного судна (при неизменных его размерах и форме) формула адмиралтейских коэффициентов с постоянным значением C_a не всегда позволяет получить правильный ответ. Также известно, что адмиралтейский коэффициент представляет собой симплекс ряда трудно учитываемых величин, в том числе пропульсивного коэффициента. Адмиралтейский коэффициент изменяется в довольно широком интервале и пригоден в качестве использования коэффициента подобия только для очень близкого прототипа при изменении относительной скорости не более чем на 3–4 %.

Выразим сопротивление движению судна в соотношении (1) через его полную массу

$$N = \frac{g D v}{A_1 K \eta}, \quad (5)$$

где K — гидродинамическое качество «голого» корпуса; g — ускорение свободного падения [5].

В выражение (5) суммарное пропульсивное качество гидродинамического комплекса входит в виде

$$C_{\text{скор}} = \frac{A_1 K \eta}{g}, \quad (6)$$

где $C_{\text{скор}}$ — суммарное пропульсивное качество.

Таким образом, для скоростных судов типа глиссеров, движущихся в условиях развитого волнообразования, мощность главных двигателей может быть представлена как

$$N = \frac{D v}{C_{\text{скор}}}. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что широко известный Адмиралтейский коэффициент также является одной из форм математических выражений суммарного пропульсивного качества. При этом Адмиралтейский коэффициент C_a и коэффициент $C_{\text{скор}}$ связаны между собой зависимостью

$$C_{\text{скор}} = \frac{C_a}{Fr_v^2 g}, \quad (8)$$

где Fr_v — число Фруда по водоизмещению.

Произведем определение суммарного пропульсивного качества глиссирующего судна, используя данные о его полной массе, скорости полного хода и установленной мощности главных двигателей. В соответствии с выражением (7) скорость судна-прототипа, его полное водоизмещение и мощность его главных двигателей связаны между собой зависимостью

$$\frac{N C_{\text{скор}}}{D} = v. \quad (9)$$

Предположим, что на судно с характеристиками D , N , v устанавливается новый двигатель другой мощности, измененной на ΔN , но очень близкий по массе ранее установленному двигателю. Такая установка не вызовет существенного изменения полного водоизмещения. Формула определения скорости измененного прототипа при фиксированном водоизмещении будут выглядеть так:

$$\frac{(N + \Delta N) C_{\text{скор1}}}{D} = v + \Delta v. \quad (10)$$

При рассмотрении выражения (10) нужно сделать две важных оговорки. Во-первых, мощность судовой энергетической установки является скалярной физической величиной, поэтому она не может быть отрицательной по определению, и понятие «модуль» применительно к мощности в данном выражении не имеет смысла. Во-вторых, при выполнении гидродинамических расчетов рассматривается движение судна с увеличением скорости (разгон), начиная от состояния покоя, но не рассматривается режим замедления движения судна, который в настоящее время мало исследован и не воспроизводится в опытовых бассейнах. При этом понятно, что режим замедления движения судна не является зеркальным отражением режима его разгона. Поэтому в выражении (10) не предполагается, что скорость может иметь отрицательное приращение.

Формула определения прироста скорости в зависимости от прироста мощности при фиксированном водоизмещении будет иметь вид

$$\frac{(C_{\text{скор1}} - C_{\text{скор}})N + \Delta N C_{\text{скор1}}}{D} = \Delta v. \quad (11)$$

Установка на это судно ряда двигателей различной мощности, но сопоставимой массы, не вызывающей существенного изменения водоизмещения судна, или просто изменение мощности установленного двигателя путем изменения его подачи топлива, но сопровождающееся изменением скорости судна, формирует множество дискретных значений: $C_{\text{скор0}}, C_{\text{скор1}}, C_{\text{скор2}}, C_{\text{скорл}}$, т. е. $C_{\text{скор}} = f(N)$. Аналогично, многократное изменение полного водоизмещения этого судна, например, за счет изменения полезной нагрузки, без изменения мощности главного двигателя, вызовет ряд изменений скорости судна и сформирует новое множество значений, т. е. $C_{\text{скор}} = \varphi(D)$. Установка на это же судно с двигателем неизменной мощности и постоянным водоизмещением различных гребных винтов с разным шаговым и дисковым отношением, вызвавшая изменение скорости, сформирует еще одно дискретное множество значений, т. е. $C_{\text{скор}} = u(v)$. Таким образом, суммарное пропульсивное качество $C_{\text{скор}}$ является функцией трех проектных характеристик судна D, N, v в виде $C_{\text{скор}} = r(D, N, v)$. С точки зрения математики, график такой функции в координатных осях D, N, v описывается областью, все точки которой удовлетворяют указанному условию. Уравнения, описывающие данную область, определяют аналитическую зависимость между характеристиками судна D, N, v .

Так как уравнения (4) и (7) являются частными случаями уравнения (3), можно утверждать, что суммарное пропульсивное качество C_{mn} является функцией полной массы, скорости и мощности судна D, N, v в виде $C_{\text{mn}} = \psi(D, N, v)$ устанавливающей зависимости между этими характеристиками. Точный вид этой зависимости неизвестен, однако накоплено достаточное число экспериментальных данных (характеристик построенных судов). Для идентификации этой зависимости в целях практического применения необходимо определенным образом сгруппировать и обработать экспериментальные данные по построенным и эксплуатирующимся судам. Современные математические методы, базирующиеся на автоматизированных способах обработки информации, в том числе, больших объемов статистических данных, реализуемых современной вычислительной техникой, предоставляют такую возможность. Для обработки множества значений, сформированного на базе экспериментальных данных, необходимо перейти от функции трех переменных к более простым функциям.

В работе А. Н. Колмогорова [6] доказано, что всякая непрерывная функция n ($n > 3$) переменных представима в виде суперпозиции непрерывных функций трех переменных. В. И. Арнольд показал [7], что всякая непрерывная функция трех переменных представима в виде суперпозиций непрерывных функций двух переменных:

$$f(x, y, z) = \sum_{i=0}^9 f_i(\varphi_i(x, y)z), \quad (12)$$

где все функции непрерывны. В том же году А. Н. Колмогоров показал [8], что каждая непрерывная функция n переменных, заданная на единичном кубе n -мерного пространства, представима с помощью операций сложения, умножения и суперпозиции из непрерывных функций

одного переменного. В частности, каждая непрерывная функция двух переменных представима в виде

$$f(x, y) = \sum_{q=1}^5 h_q [\varphi_q(x) + \psi_q(y)]. \quad (13)$$

Теорема Вейерштрасса об аппроксимации утверждает, что непрерывную функцию нескольких переменных на замкнутом ограниченном множестве можно равномерно приблизить последовательностью полиномов. Теорема Стоуна дает правило конструирования конкретных обобщений теоремы Вейерштрасса для компактного пространства и множества непрерывных функций, заданного на компактном пространстве с вещественными значениями. Опираясь на аппроксимационную теорему Вейерштрасса и теорему Стоуна, решаются задачи по приближению функций многих переменных с помощью полиномов и суперпозиций функций одного переменного. Доказана возможность аппроксимации функции многих переменных с любой степенью точности суперпозициями и линейными комбинациями функций одной переменной.

Рассматриваемая задача относится к категории задач по оценке и аппроксимации по нескольким точкам функций вход-выход для решения в дальнейшем задачи прогноза неизвестных значений выходов по известным входам.

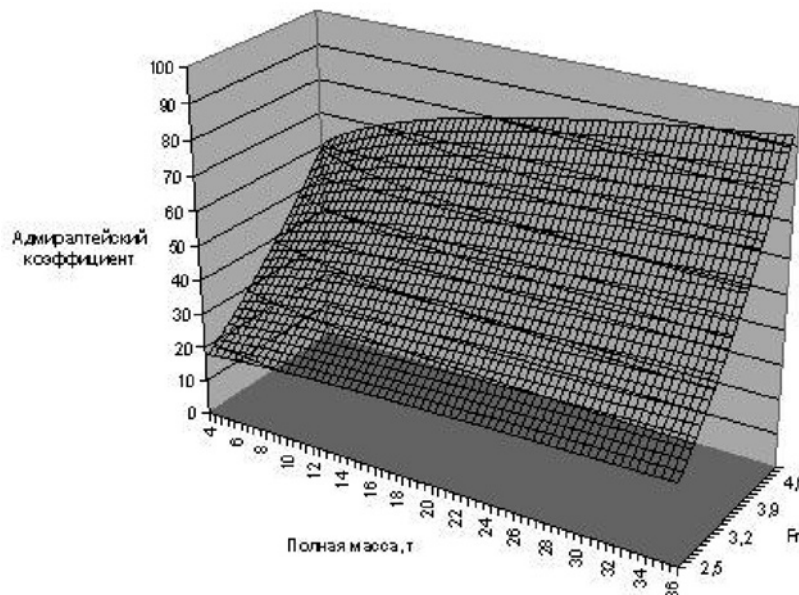


Рис. 1. Изменение Адмиралтейского коэффициента при изменении полной массы и числа Фруда по водоизмещению

Одним из наиболее мощных аналитических методов исследования является разделение («разбиение») базы данных на группы для сравнения структуры получившихся подмножеств. Эти методы широко применяются как в разведочном анализе данных, так и при проверке гипотез, и известны под разными названиями (классификация, группировка, кластерный анализ, категоризация, разбиение, расслоение и пр.). Для количественного описания различий между группами наблюдений разработаны многочисленные вычислительные методы, основанные на группировке данных. Это, например, дисперсионный анализ. Однако графические средства, например, категоризованные графики, дают на стадии качественного физического анализа особые преимущества и позволяют выявить закономерности, которые трудно поддаются количественному описанию, такие, как сложные взаимосвязи, исключения или аномалии, скачки в изменении функции, проявления дискретности, и которые весьма сложно обнаружить с помощью вычислительных процедур. В этих случаях графические методы предоставляют уникальные возможности многомерного аналитического исследования данных [9].

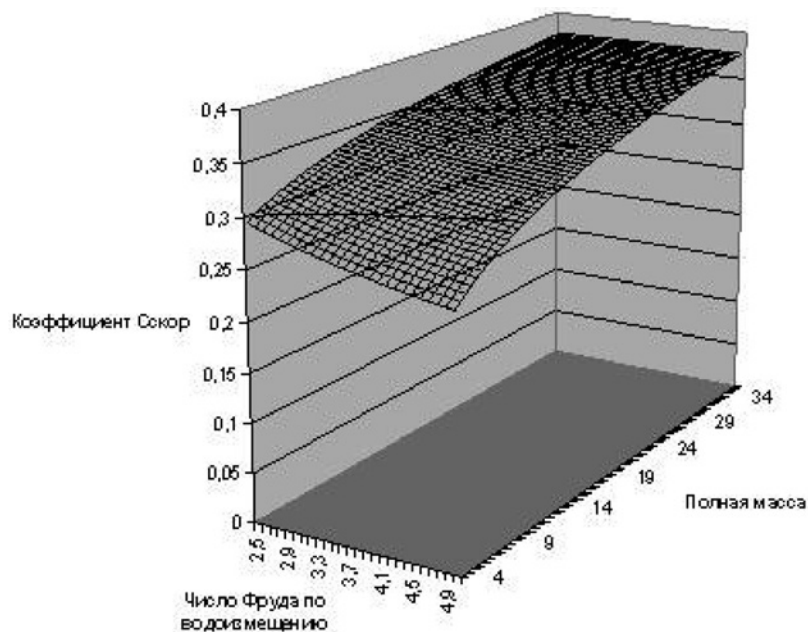


Рис. 2. Изменение коэффициента $C_{\text{скор}}$ при изменении полной массы и скорости

Для обеспечения объективности расчета его необходимо выполнять независимо для двух различных функций одного переменного. В качестве функций одного переменного могут быть выбраны зависимости значений $C_{\text{скор}}$ от скорости v и числа Фруда по водоизмещению Fr_v . Сгруппированные данные, затем необходимо аппроксимировать по степенному закону и построить исходные статистические зависимости $C_{\text{скор}}^*$ для значений полной массы D , значений скорости v и значений числа Фруда по водоизмещению Fr_v . После получения семейства графиков, отражающих зависимости значений суммарного пропульсивного качества $C_{\text{скор}}$ и от скорости v и числа Фруда по водоизмещению Fr_v , и уравнений аппроксимации по каждому из значений полной массы, по которым проводилась первичная группировка подмножеств, необходимо построить поверхности отражающие зависимости по всему множеству значений экспериментальных данных.

Для идентификации взаимосвязи между полной массой судна его мощностью и скоростью сформирована база данных, включающая множество значений этих характеристик для 274 глиссирующих судов из композиционных материалов производства США, стран Европы и Азии. Обводы этих судов являются остроскулыми, с достаточно большими углами килеватости и продольными реданами. В качестве движителей применены гребные винты с большим дисковым отношением. На судах малых размеров (длиной до 10 – 11 м) используются поворотно-откидные колонки. На некоторых, наиболее скоростных судах установлены приводы Арнесона. Суда, являющиеся объектом анализа, имеют водоизмещение от 2 до 160 т, длину от 9 до 42 м, установленную мощность главных двигателей от 200 до 8000 кВт, скорость полного хода от 10 м/с (19 уз) до 21 м/с (40 уз). Исходные данные по проектам этих судов были взяты из специализированных справочно-информационных изданий, а также информационных ресурсов Интернета. Подробнее техника выполнения данного расчета описана в [10].

Произведен анализ величины суммарного пропульсивного качества для скоростных судов типа глиссеров в виде коэффициента $C_{\text{скор}}$ и Адмиралтейского коэффициента C_a (рис. 1 и 2). Рассмотрен еще один вид уравнения «Мощности – Ходкости». В отличие от адмиралтейского коэффициента скорость в эту формулу входит в первой степени, а величина смоченной поверхности корпуса, как и в формуле адмиралтейских коэффициентов, учитывается показателем $2/3$ у величины полной массы. Мощность при этом может быть выражена как

$$N = \frac{vD^{2/3}}{C_f} \quad (14)$$

Соответственно, суммарное пропульсивное качество в этой форме C_f имеет вид (рис. 3)

$$C_f = \frac{VD^{2/3}}{N} \quad (15)$$

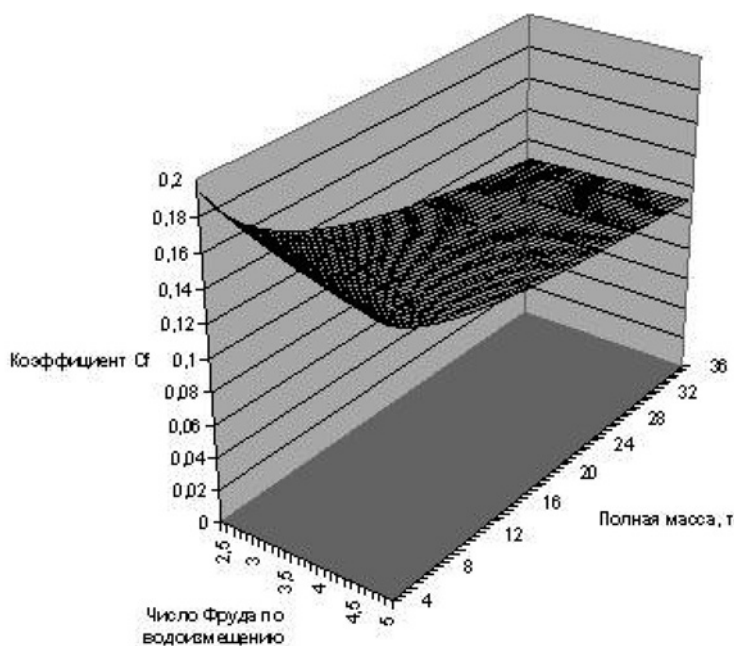


Рис. 3. Изменение коэффициента C_f в зависимости от полной массы и скорости для глиссеров

Для оценки работоспособности полученных результатов проектного анализа характеристик полной массы, мощности и скорости глиссирующих судов из композитов выполнен проверочный расчет характеристик мощности при заданной скорости для ряда известных скоростных глиссирующих судов отечественной постройки. Рассматриваемые суда не входили в обрабатываемые при проектном анализе базы данных.

Проверочный расчет выполнен для следующих скоростных судов:

- скоростное судно проекта 14170;
- скоростное судно проекта 12260;
- скоростное судно проекта 12150;
- скоростное судно проекта 12200.

Проектные характеристики перечисленных судов взяты из открытых источников. Подробнее о выполненном расчете написано в [11]. Погрешность отклонения полученных величин мощности от проектных значений при этом находится в пределах 2,7 – 5,2 % (рис. 4).

Значения мощности построенных судов, рассчитанные с помощью различных по форме уравнений «Мощности – Ходкости» с изменяющимися показателями от 1 до 2/3 у полной массы D и с изменяющимися показателями от 1 до 3 у скорости V , входящими в уравнения, имеют достаточно близкие значения. Таким образом, для определения мощности остроскулых глиссирующих судов, движущихся в условиях развитого волнообразования, можно использовать величину рассчитанного численными методами суммарного пропульсивного качества в виде Адмиралтейского коэффициента C_a , а также коэффициентов $C_{\text{скор}}$ и C_f . Это обусловлено природой коэффициентов C_a , $C_{\text{скор}}$, C_f и $C_{\text{мл}}$, входящих в уравнения «Мощности – Ходкости». Они являются различными математическими выражениями одной и той же самостоятельной физической величины — суммарного пропульсивного качества гидродинамического комплекса скоростного судна. Чем более эффективными, с точки зрения математики, методами они будут определены при разработке математической модели уравнения «Мощности – Ходкости», тем точнее будет определена установленная мощность главных двигателей скоростного судна.

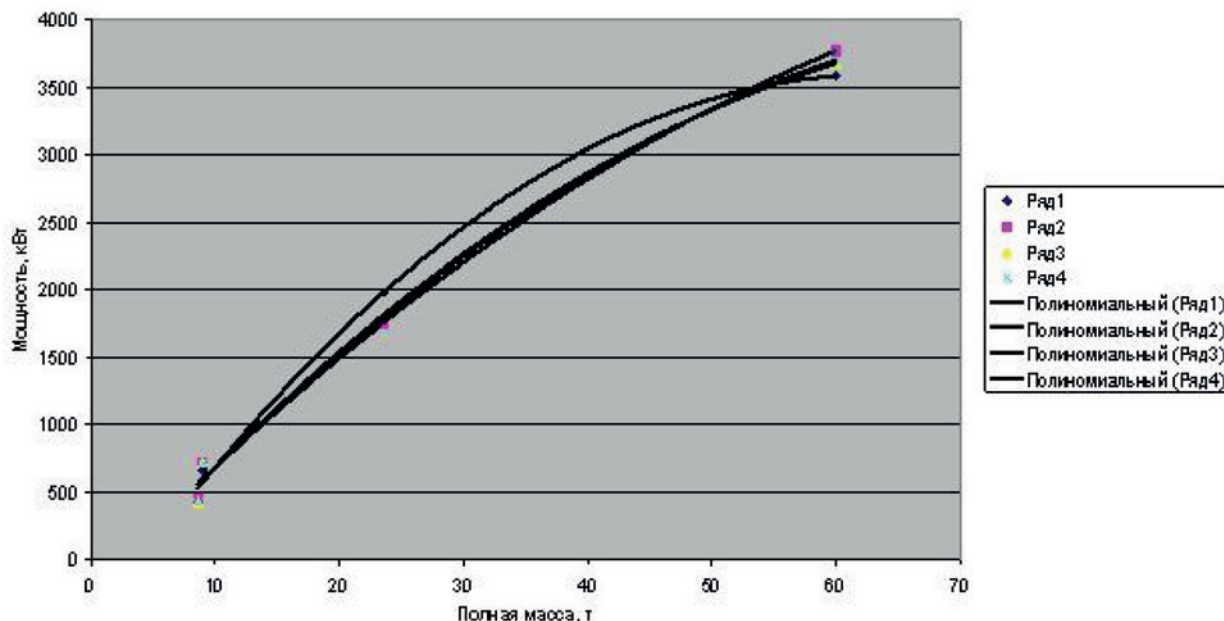


Рис. 4. Сравнение мощности построенных судов по данным разработчиков (1-й ряд) и мощности, рассчитанной при помощи различных коэффициентов (2-4-й ряды)

Для практического применения данного способа было разработано компьютерное приложение, которое позволяет определить установленную мощность главных двигателей судна, достаточную для обеспечения заданного скоростного режима, который задается относительной скоростью в виде числа Фруда по водоизмещению.

При этом значение полной массы задается вручную с округлением до 0,5 т, а относительная скорость в виде числа Фруда по водоизмещению в интервале $Fr_v = 2,5 - 5$ задается с точностью 0,1.

Интерфейс приложения 'Мощность' содержит поля для ввода 'Число Фруда' (значение 3,5) и 'Полная масса' (значение 16). Справа от этих полей находятся кнопки 'Расчет' и 'Сохранить'. Ниже этих полей расположен список параметров с их значениями:

Ca	29.95661491
Cf	.131593356
Cскор	.339203665
Nсскор	703.561180288712
Nca	703.365698593227
Ncf	719.673171904444

Рис. 5. Вид интерфейса компьютерного приложения

Компьютерное приложение разработано с учетом следующих условий:

- обеспечение возможности задавать параметры расчетов через интерфейс;
- реализация описанного алгоритма расчетов;
- обеспечение функционала сохранения результата с возможностью последующей печати.

Помимо формализованных требований, имеются не формализованные, но известные ограничения:

– обязательная работа с использованием OS Windows XP SP3 без установленных обновлений и dotNet;

– сохранение минимального размера дистрибутива, для обеспечения возможности передачи через электронную почту и другие «узкие» каналы.

Вследствие ограничений, накладываемых при постановке задачи, а так же относительной простоты алгоритмов расчетов в качестве среды разработки был выбран Visual Basic 6. В качестве первого шага была разработана программа-макет, реализующая один из алгоритмов расчета. Основной задачей при этом было согласование внешнего вида программы и скорости ее работы. Для представления результатов в программе была использована хорошо себя зарекомендовавшая grid-форма. В данном случае это был наиболее верный подход, который позволяет хорошо структурировать расчетные данные при выводе на экран, а в дальнейшем дает инструмент для их последующей обработки. Для сохранения данных был выбран формат html, что позволяет гарантировать работу программы без установки дополнительного программного обеспечения на компьютере проектанта (Браузер входит в состав OS). Кроме того, это гарантирует одинаковость печатных форм отчетов.

Программа-шаблон прошла процедуры тестирования, и после получения положительной обратной связи было продолжена разработка всего комплекта приложений. При реализации приложения по расчету мощности было определено требование в виде получения данных из MS Excel-файлов. В связи с тем, что необходимо было сохранить возможность изменять данные на стороне проектанта, при разработке данной программы пришлось пожертвовать возможностью работы данного приложения без дополнительного ПО на компьютере. Для использования данного приложения необходима установка на компьютере проектанта комплекта MS Office.

Число Фруда	3,5
Полная масса	16
C_a	29.95661491
C_f	.131599356
C_c	.339203665
N_{C_c}	703.561180288712
N_{C_a}	703.365698593227
N_{C_f}	719.673171904444

Рис. 6. Форма отчета компьютерного приложения

Вид интерфейса компьютерного приложения, позволяющего производить расчет установленной мощности, приведен на рис. 5. В приложении реализована возможность проверки результатов, полученных при помощи обработки баз данных, с помощью одновременного расчета мощности по всем трем коэффициентам. Данные, полученные расчетом, отражаются в соседних строках друг над другом. Отклонение значений мощности, определенных с помощью различных коэффициентов, не превышает 2 – 5 %. Сохраненные данные оформляются в виде отчета и могут быть распечатаны. Форма отчета представлена на рис. 6.

Использование описанного компьютерного приложения позволяет проектанту по заданным значениям полной массы судна и его относительной скорости в виде числа Фруда по водоизме-

щению получать характеристики установленной мощности скоростного глиссирующего судна из композитов или целого семейства судов такого типа в течение нескольких секунд. Это компьютерное приложение дает возможность разработчику реализовать вариативную модель проектирования развездного судна из композитов, опирающуюся на использование параметрических методов и существенно упрощающую оптимизацию проектируемого судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздjunин В. Л. Теория проектирования судов: в 2 ч. / В. Л. Поздjunин. — Л.: Изд-во ЛКИ, 1938. — Ч. 1.
2. Егоров И. Т. Ходкость и мореходность глиссирующих судов / И. Т. Егоров, М. М. Буньков, Ю. М. Садовников. — Л.: Судостроение, 1978. — 169 с.
3. Savitsky D. Hydrodynamic Design of Planing Hulls / D. Savitsky // Marine Technology. — 1964. — Vol. 1.
4. Nazarov A. On Application of Parametric Method for Design of Planing Craft / A. Nazarov // 3rd Chesapeake Power Boat Symposium. — USA, 2012. — P.102.
5. Ваганов А. М. Проектирование скоростных судов / А. М. Ваганов. — Л.: Судостроение, 1978. — 156 с.
6. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями функций меньшего числа переменных / А. Н. Колмогоров // Доклады Академии наук СССР. — 1956. — Т. 108. — С. 179–182.
7. Арнольд В. И. О функциях трех переменных / В. И. Арнольд // Доклады Академии наук СССР. — 1957. — Т. 114. — № 4. — С. 679–681.
8. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения / А. Н. Колмогоров // Доклады Академии наук СССР. — 1957. — Т. 114. — С. 953–956.
9. Лоран П.-Ж. Аппроксимация и оптимизация / П.-Ж. Лоран. — М.: Мир, 1975. — 498 с.
10. Францев М. Э. Проектное обоснование оптимальных сочетаний характеристик массы, мощности и скорости для скоростных судов из композитов методами анализа баз данных / М. Э. Францев // Наука и техника транспорта. — 2010. — № 3. — С. 53–59.
11. Францев М. Э. Проектный анализ различных форм уравнения «Мощности – Ходкости» при разработке проекта скоростного судна из композитов / М. Э. Францев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 220–224.

THE MODE OF DETERMINE OF THE TOTAL PROPULSIVE QUALITY OF HYDRODYNAMIC COMPLEX IN THE PROJECT OF THE PLANING CRAFT FROM COMPOSITES

The article discusses the mode of determine of the total propulsive quality of hydrodynamic complex of the planing craft from composites which uses numerical methods. The equation of power-propulsion is one of the most important equations of rational logical-mathematical model to optimize the characteristics of the vessel. Regression analysis calculated changes in the value of the total propulsive quality of planing crafts for different forms of the equations of power, propulsion, including formula Admiralty coefficients. To evaluate the efficiency of the results of the project analysis of the characteristics of the total mass, power and speed planing crafts made of composite test calculates the performance of the power at a given speed. The calculation is performed for a number of well-known high-speed planing crafts of domestic buildings, were not part of the database being processed with a minimum error. The computer application allows you to implement the method of calculating the total propulsive quality for planing crafts from composites. This computer application allows the developer to implement alternative models of designing a traveling ship from composites, based on the use of parametric methods, and greatly simplifies the optimization of projected vessel.

Keywords: planing crafts from composites, total propulsive quality, numerical methods, computer application.

REFERENCES

1. Pozdjunin, V. L. *Teorija projektirovanija sudov. Ch. 1.* L.: Izd-vo «LKI», 1938.

2. Egorov, I. T., M. M. Bunkov, and Ju. M. Sadovnikov. *Hodkost i morehodnost glissirujushhih sudov*. L.: Sudostroenie, 1978.
3. Savitsky, D. "Hydrodynamic Design of Planing Hulls." *Marine Technology* 1 (1964).
4. Nazarov, A. "On Application of Parametric Method for Design of Planing Craft." *3rd Chesapeake Power Boat Symposium*. USA, 2012: 102.
5. Vaganov, A. M. *Proektirovanie skorostnyh sudov*. L.: Sudostroenie, 1978.
6. Kolmogorov, A. N. "O predstavlenii nepreryvnyh funkciy neskol'kih peremennyh superpozicijami funkciy men'shego chisla peremennyh." *Doklady Akademii nauk SSSR* 108 (1956): 179-182.
7. Arnold, V. I. "O funkciyah treh peremennyh." *Doklady Akademii nauk SSSR* 114.4 (1957): 679-681.
8. Kolmogorov, A. N. "O predstavlenii nepreryvnyh funkciy neskol'kih peremennyh v vide superpozicij nepreryvnyh funkciy odnogo peremennogo i slozhenija." *Doklady Akademii nauk SSSR* 114 (1957): 953-956.
9. Loran, P.-Zh. *Approksimacija i optimizacija*. M.: Mir, 1975.
10. Fratsev, M. Je. "Project study of optimum combinations of characteristics of weight, capacity and speed for high-speed ships from composites with analysis methods of databases." *Science and Technology in Transport* 3 (2010): 53-59.
11. Frantsev, M. Je. "The project's analysis of different forms of the equation, «power-propulsion» during the drafting of high-speed vessel from composites." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2012): 220-224.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Францев Михаил Эрнстович —
кандидат технических наук.
Инжиниринговая компания «Нептун-Судомонтаж»
gepard629@yandex.ru
Францев Илья Михайлович — инженер.
Инжиниринговая компания «Нептун-Судомонтаж»
ilya.frantsev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Frantsev Michail —
Candidate of Engineering.
JSC Neptun-Sudomontazh
gepard629@yandex.ru
Frantsev Ilya — engineer.
JSC Neptun-Sudomontazh
ilya.frantsev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2015 г.

УДК 620.197:629.12(4)

И. И. Рублёв

РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОРПУСОВ МОРСКИХ СУДОВ

Разработана экологически безопасная рецептура защитного покрытия металлических корпусов морских судов, предназначенная для снижения скорости коррозии. Предложенное техническое решение позволяет, с одной стороны, повысить срок действия материала корпусов судов, а с другой — снизить интенсивность загрязнения морской среды соединениями тяжёлых металлов. Последнее отвечает требованиям судоходных морских регистров ведущих морских держав в части исключения соединений тяжёлых металлов из композиций защитных наполнителей и лакокрасочных покрытий. В качестве объекта исследования выбрана углеродистая прокатная листовая сталь марки СТ-20. Покрытие стальных образцов осуществлялось стандартными и экспериментальными наполнителями. Исследования препарированных образцов осуществлялись на воздухе, в морской среде длительное время, при различных температурах, pH-средах и относительной влажности атмосферного воздуха. Приняты следующие методы исследования: определение скорости коррозии стальных образцов — весовой метод, поверхность образцов исследовалась с помощью микроскопа, pH-метрия отработанной морской среды. Одним из наиболее сложных вопросов при разработке композиций наполнителей был вопрос измельчения компонентов защитного наполнителя с определённой дисперсностью. Предложен метод объемного взрыва для разрушения исходных материалов до пылеобразных частиц заданной дисперсности.

В результате длительных испытаний в морской среде скорость коррозии металлических поверхностей, покрытых разработанным новым экологически безопасным наполнителем, ниже, чем металлических поверхностей, покрытых алкидными составами.

Ключевые слова: электрохимические процессы, морская среда, фракция, дисперсность, локальная и общая коррозия металлов, эластомер, диспергент.

Введение

В настоящее время используются такие способы защиты металла как легирование, ингибиторная электрохимическая защита, защитные покрытия. Лакокрасочные покрытия часто используют в сочетании с протекторной или катодной защитой [1]. Для повышения коррозионной стойкости судовых конструкций, выполненных из стали, ее легируют хромом, никелем, титаном, молибденом. Коррозионная стойкость хромоникелевой нержавеющей стали в морской воде достигается только при содержании в ней 17 – 19 % хрома и 8 – 10 % никеля, из-за чего значительно повышается стоимость металла. Следует учитывать, что нержавеющая сталь, являясь коррозионностойкой в морской воде, в то же время склонна к язвенной коррозии и требует дополнительных затрат на электрохимическую защиту.

Актуальность исследования

Из-за высокой стоимости легированных сталей, титановых сплавов и сложной технологии применения доля их в судостроении незначительна. Более широко в морском судостроении используется медь и ее сплавы, которые применяются для деталей судовых механизмов, эксплуатирующихся в морской среде без специальных средств защиты от коррозии. К преимуществу медных сплавов следует отнести то, что они меньше подвержены обрастанию морскими организмами. Однако их применение ограничивается дефицитностью меди и ее стоимостью [2].

Постановка задачи

Разработать защитный наполнитель для повышения коррозионной устойчивости металлических корпусов судов, эксплуатирующихся в «жестких» морских условиях. Минимизировать влияние внешних факторов окружающей среды, которые содержат в себе опасность потери прочности корпуса судна в сложных гидрометеорологических условиях, вследствие развития аварийных ситуаций, экологических катастроф. Из всех видов защитных покрытий в судостроении наибольшее распространение получили лакокрасочные, чему способствуют сравнительно низкая их стоимость и простота нанесения. Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные системы, способные при нанесении на защищаемую поверхность высыхать с образованием пленок, удерживаемых силами Ван-дер-Ваальса. Эта пленка не только защищает металл от внешней среды, но и препятствует образованию гальванических пар на поверхности металла.

По сравнению с лакокрасочными металлические покрытия обладают большей механической прочностью, но из-за сложности нанесения покрытия стоимость их приготовления высока. Металлические защитные покрытия наносят гальваническим, химическим и термическим способами. В судостроении наиболее широко используются оцинкованные материалы.

Силикаты и алкоксиланы находят широкое применение в рецептурах грунтовок для разнообразных металлических и кремнистых субстратов. Широко применяются в качестве усилителей адгезии грунтовки на основе алкоксиланов с регулируемой гидрофобностью, достаточной стойкостью к УФ-облучению, термостойкостью, поверхностной активностью, стабильностью к воздействию химических соединений. Интересным представляется использование силиконовых технологий для замены грунтовок, содержащих цинк и хром [3], [4]. Покрытие должно обладать достаточным сроком службы при междоковом периоде эксплуатации [5].

Методика эксперимента [5]. Перед экспериментами поверхность металлических образцов тщательно очищалась, обезжиривалась растворителями и покрывалась гомогенной смесью, включающей сырую резину и новый наполнитель (без соединений тяжелых металлов) в соотношении 1:1 (масс.). Покрытие проводилось в три слоя с выдержкой на просушку. Второй образец был очищен, обезжирен и покрыт гомогенной смесью, включающей сырую резину и наполнитель в соотношении 1:1 (масс.), и после просушки покрыт алкидной эмалью. Стандартный образец готовился согласно методике, описанной в работе [5]. Исследование образцов проводилось на воздухе при температуре 21 °С в течение трёх недель, в морской воде при температуре 4 – 46 °С в течение двух месяцев.

Результаты исследований образцов в виде микрофотографий, скорость коррозии экспериментальных и стандартных образцов приведены в работах [5], [6], [8], [9]. Скорость коррозии определялась по формуле

$$r = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (1)$$

где Δm — изменение массы образцов за время испытаний, г; S — площадь поверхности образцов, м^2 ; τ — время исследований, ч.

В результате анализа микрофотографий образцов следует отметить, что после всего цикла испытаний на поверхности стандартного образца появляются макротрещины, что приводит к развитию коррозионных процессов, а поверхность экспериментального образца монолитна, без повреждений, что свидетельствует о достаточной эластичности защитного экспериментального покрытия.

В результате исследований [5] – [8] было обращено внимание на то, что используемые методы измельчения исходных материалов не обеспечивали их необходимую дисперсность. С целью устранения этого недостатка был предложен метод объемного взрыва исходных пористых материалов. Суть процесса — фрагменты материалов загружаются в замкнутую ёмкость и заполняются парами легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) на определённое время. При этом материал заполняется парами ЛВЖ, включая макро-, микро- и мезопоры. При генерировании разряда пары ЛВЖ с воздухом в диапазоне от нижнего до верхнего пределов воспламенения взрываются, что приводит к резкому повышению давления в порах материала и, как следствие, к его внутреннему разрушению и измельчению.

Создана установка, которая предназначена для измельчения исходных компонентов для последующего приготовления защитного наполнителя (рис. 1). В рабочей камере 3 размещались фрагменты исходных компонентов защитного покрытия. После этого камера заполнялась расчётным количеством легковоспламеняющейся жидкости (в данном случае ацетон), для испарения её и создания взрывоопасной паровоздушной смеси. Соблюдая меры предосторожности на безопасном расстоянии, запускался генератор, искра инициировала горючую смесь в камере 3, взрывная волна распространялась во фрагменты исходных материалов, подвергая их разрушению вплоть до мелкодисперсного состояния. Для предотвращения разрыва рабочей камеры 3 из-за повышения давления, в камере 5 изготовлено технологическое отверстие 1, которое до момента взрыва плотно закрыто предохранительной мембраной. Проходя сито 7, измельченный материал выгружался через колосниковую решетку 6.

В процессе эксплуатации подводная часть судна подвержена биообрастанию, что приводит к следующим отрицательным факторам [9] – [10]:

- повышению сопротивления движению судна;
- снижению скорости судна на 5 – 10 %;
- повышению расхода топлива на 10 – 15 %;
- нарушению остойчивости судна из-за нерегулярности процесса биообрастания;
- повышению эксплуатационных и финансовых расходов на трудоёмкую процедуру обработки корпусов судов.

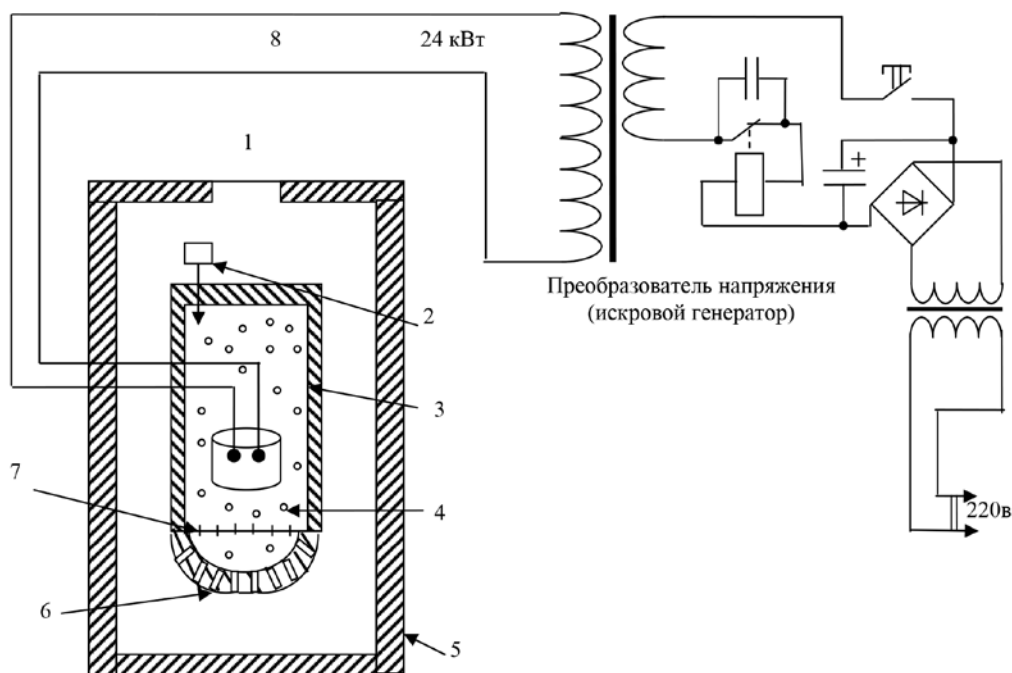


Рис. 1. Установка для измельчения компонентов защитного покрытия:

- 1 — предохранительная мембрана; 2 — капсула с легковоспламеняющейся жидкостью;
3 — рабочая камера взрыва; 4 — исходные материалы наполнителя;
5 — защитная камера; 6 — колосниковая решетка для выгрузки измельченного материала;
7 — сито; 8 — высоковольтные провода

Помимо указанных отрицательных факторов биообрастания корпусов судов следует отметить интенсификацию процессов коррозии металлических поверхностей корпусов судов под слоем продуктов биообрастания. Это необходимо учитывать, либо создавать условия для ингибирования процессов биообрастания.

Выводы

1. Проведён анализ защитных покрытий корпусов морских судов, предназначенных для снижения скорости коррозии металлических поверхностей. Вследствие деформационных напряжений поверхностного покрытия, обусловленных изменением температуры морской среды, защитное покрытие разрушается, появляются трещины, что инициирует развитие электрохимических процессов металлических поверхностей, их коррозию и, как следствие, загрязнение морской среды соединениями тяжелых металлов.

2. Для исключения отмеченных недостатков стандартных защитных покрытий корпусов судов разработаны новые наполнители для создания защитных покрытий корпусов судов, не содержащих в своём составе соединений тяжелых металлов, запрещенных национальными морскими регистрами судоходства, Резолюциями Международной морской организации.

3. Разработана методика получения новых защитных покрытий.

4. Проведены длительные испытания образцов металлов, покрытых защитным слоем на воздухе, в морской среде, имитирующей состав и гидрометеорологические условия Средиземного и Чёрного морей.

5. Установлено, что скорость коррозии металлических корпусов судов, покрытых новыми защитными наполнителями, в два-пять раз ниже по сравнению со стандартными образцами.

6. Техничко-экономические показатели нового защитного покрытия выгодно отличаются от стандартного, поскольку его производство базируется на использовании материальных отходов, не содержащих соединений тяжелых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Majmude A. Microfluidic Adhesion Induced by Subsurface Microstructures / A. Majmude, A. Ghatak, A. Sharma // Science. — 2007. — Т. 318. — № 5848. — Pp. 258–261.
2. Huang Y. Y. Stamp Collapse in Soft Lithography / Y. Y. Huang, W. Zhou, K. J. Hsia, E. Menard, J. U. Park, J. A. Rogers, A. G. Alleyne // Langmuir. — 2005. — Т. 21. — № 17. — Pp. 8058–8068. DOI:10.1021/la0502185.
3. Pocius A. V. Adhesion and adhesives technology: an introduction / A. V. Pocius. — Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
4. Леонов В. Е. Основы экологии и охрана окружающей среды / В. Е. Леонов, В. Ф. Ходаковский, Л. Б. Куликова. — Херсон: ХГМИ, 2010. — 351 с.
5. Леонов В. Е. Исследование коррозионной устойчивости металлических корпусов судов, обработанных эффективным наполнителем / В. Е. Леонов, И. И. Рублёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 99–104.
6. Леонов В. Е. Методика исследования и разработки стойких экологически безопасных покрытий корпусов судов / В. Е. Леонов, И. И. Рублёв // Современные энергетические установки на транспорте и технологии и оборудование для их использования: сб. тр. конф. — Херсон: ХГМА, 2012. — С. 87–91.
7. Леонов В. Е. Исследование и разработка стойких экологически безопасных покрытий корпусов судов / В. Е. Леонов, И. И. Рублёв // Материалы межд. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные науки сегодня». — М., 2013. — С. 197–199.
8. Леонов В. Е. Исследование стабильности действия защитного покрытия на скорость коррозии металлических поверхностей корпусов судов / В. Е. Леонов, И. И. Рублёв // Современные энергетические установки на транспорте и технологии и оборудование для их использования: сб. тр. конф. — Херсон: ХГМИ, 2014. — С. 193–197.
9. Обеспечение безопасности плавания судов и предотвращение загрязнения окружающей среды / В. И. Дмитриев, В. Е. Леонов, П. Г. Химич, В. Ф. Ходаковский, Л. Б. Куликова. — Херсон: ХГМА, 2012. — 399 с.
10. Леонов В. Е. Механизм действия защитного покрытия корпусов судов в условиях штатного рейса / В. Е. Леонов, И. И. Рублёв // XI Межд. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании»: сб. тр. конф. — Болгария – Варна: Технический университет, 2015. — С. 82–86.

DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY SOUND FILLERS, DESIGNED TO IMPROVE THE CORROSION RESISTANCE OF SHIP HULLS

Developed environmentally friendly formulation of the protective coating of metal hulls of ships designed to reduce the rate of corrosion. The proposed solution will allow one hand to increase the term of the metal hulls of ships and on the other - to reduce the intensity of marine pollution, heavy metal compounds. As the object of study selected carbon steel plate mill brand ST-20. The coating of steel samples by standard and experimental fillings. Studies of the prepared samples was carried out in air, in a marine environment for a long time at various temperatures, pH - temperature and relative atmospheric humidity. The following research methods - Determination of corrosion rate of steel specimens - gravimetric method, the surface of the samples was studied using a microscope, pH - meters of waste marine environment. One of the most difficult issues in the development of the compositions of fillers was a matter of grinding components with a certain protective filler dispersion. A method for the destruction of the bulk of the explosion of raw materials to the dispersion of dust particles of a given

As a result, long-term tests in a marine environment, the rate of corrosion of metal surfaces coated developed a new environmentally friendly vehicle, is lower than with a metal surface coated with alkyd formulations.

Keywords: electrochemical processes, the marine environment, faction, dispersion, local and general corrosion of metal, elastomer dispersant.

REFERENCES

1. Majumder, Abhijit, Animangsu Ghatak, and Ashutosh Sharma. "Microfluidic adhesion induced by subsurface microstructures." *Science* 318.5848 (2007): 258-261.
2. Huang, Yonggang Y., Weixing Zhou, K. J. Hsia, Etienne Menard, Jang-Ung Park, John A. Rogers, Andrew G. Alleyne. "Stamp Collapse in Soft Lithography." *Langmuir* 21.17 (2005): 8058–8068. DOI:10.1021/la0502185.

3. Pocius, Alphonsus V. *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
4. Leonov, Valeriu Evgenevich. *Osnovy ekologii i ochrana okrugachei sredy*. Kherson: KhDMA, 2010.
5. Leonov, Valeriu Evgenevich, and I. I. Rublov. "Study of corrosion resistance of metallic hulls of ships treated by effective fillers." *Vestnik gosydarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota* 3(25) (2014):99–104.
6. Leonov, Valeriu Evgenevich, and I. I. Rublov. "Metodika isledovania i razrabotki stoikih ecologycheskih bezopasnuh pocritiu corpusov sydov." *Sovremennye jenergeticheskie ustanovki na transporte i tehnologii i oborudovanie dlja ih ispol'zovanija: sbornik trudov konferencii*. Herson: HDMA, 2012: 87–91.
7. Leonov, Valeriu Evgenevich, and I. I. Rublov. "Isledovania i razrabotka stoikih ecologycheski bezopasnih pocritiy korpysov sydov." *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Fundamentalnye i prikladnye nauki segodnja"*. M., 2013: 197–199.
8. Leonov, Valeriu Evgenevich, and I. I. Rublov. "Isledovanie stabilnosti deistvia zashitnogo pokritia na scorost korozii metalicheskoy poverhnosti corpusov sydov." *Sovremennye jenergeticheskie ustanovki na transporte i tehnologii i oborudovanie dlja ih ispolzovanija: sbornik trudov konferencii*. Herson: HDMA, 2014: 193–197.
9. Dmitriev, Vladimir Ivanovich, V. E. Leonov, P. G. Himich, V. F. Hodakovskij, and L. B. Kulikova. *Obespechenie bezopasnosti plavania sydov i predotvrachenie zagreznennia okrugaushei sredi*. Kherson: KhDMA, 2012.
10. Leonov, Valeriu Evgenevich, and I. I. Rublov. "Mehanizm deistvia zashitnogo pokritia corpusov sudov v usloviah statnogo reisa." XI Mezhdunarodnaja konferencija "Strategija kachestva v promyshlennosti i obrazovanii": sbornik trudov konferencii. Bolgarija–Varna: Tehniceskij universitet, 2015: 82–86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рублёв Илья Иванович — аспирант.
 Научный руководитель:
 Леонов Валерий Евгеньевич —
 доктор технических наук, профессор.
 Херсонская государственная морская академия
 Leonov_V_E@i.ua

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rublov Ilija Ivanovich — postgraduate.
 Supervisor:
 Leonov Valeriu Yevgenevich —
 Dr. of Technical science, professor.
 Kherson State Maritime Academy
 Leonov_V_E@i.ua

Статья поступила в редакцию 12 октября 2015 г.

УДК 629.5

М. С. Горохов

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ НАБОРА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КОРПУСА

Существенное влияние на экономические и эксплуатационно-технические показатели железобетонного корпуса оказывает используемая в нем система набора и технология его постройки. Рассмотрены основные преимущества и недостатки различных систем набора железобетонного корпуса. Существующие на данный момент рекомендации по применению той или иной системы набора при заданной длине корпуса потеряли свою актуальность, так как не учитывают многие современные экономические и технологические факторы. С использованием специально разработанной программы для ЭВМ проведен анализ влияния различных систем набора, характера расположения внутренних переборок, технологических и экономических условий предприятия-строителя на величину строительной стоимости железобетонного корпуса в зависимости от его главных размерений. В ходе выполнения численного эксперимента установлены границы областей рационального применения той или иной системы набора корпуса. Предложена принципиально новая перспективная система набора корпуса, позволяющая минимизировать его строительную стоимость.

Ключевые слова: система набора, железобетонный корпус, строительная стоимость, тариф, грузоподъемность, численный эксперимент, длина корпуса.

МНОГОЛЕТНЯЯ практика эксплуатации стоечных железобетонных судов показала их высокие эксплуатационные качества [1] и технико-экономические характеристики. Железобетон, как материал корпусных конструкций, целесообразно использовать в судостроении при постройке различных типов стоечных судов [2], для которых незначительное утяжеление корпуса и увеличение осадки не приводит к отрицательным последствиям и вполне компенсируется ремонтпригодностью, дешевизной эксплуатации и относительно невысокой строительной стоимостью [3]. Существенное влияние на экономические и эксплуатационно-технические показатели качества железобетонного корпуса оказывает используемая в нем система набора и технология его изготовления [4]. В железобетонном судостроении при постройке корпусов используются четыре системы набора: продольная, поперечная, смешанная и безнаборная конструкция. Каждая из систем обладает определенными преимуществами и недостатками [5].

Продольная система набора характеризуется наличием часто расположенных, с одинаковым шагом по днищу, палубе и бортам, продольных балок постоянного сечения и поперечных переборок, расставленных через 3 – 5 м. Данная система набора хорошо воспринимает общий изгибающий момент, что позволяет снизить расход строительных материалов при постройке корпуса. Недостатком ее является низкая местная прочность и сложность использования внутреннего объема корпуса из-за наличия в нем часто расставленных поперечных переборок. Данная система набора в основном используется, когда актуальной становится задача обеспечения общей продольной прочности.

Поперечная система набора [6] характеризуется наличием одинаковых шпангоутных рам, расположенных с одинаковым шагом по длине корпуса. Как правило, при данной системе набора корпус имеет одну или две продольные переборки, служащие опорами для горизонтальных балок шпангоутов. Преимущество данной системы набора состоит в возможности обеспечения высокой местной прочности и в удобстве использования отсеков внутри корпуса для размещения груза и обустройства помещений. Недостатком является значительный перерасход материала по сравнению с продольной системой при постройке судов большой длины.

При смешанной системе набора палуба и днище выполняются по продольной системе набора, а борта — по поперечной. Для данной системы набора характерно частое расположение поперечных переборок и отсутствие продольных. Преимуществом этой системы набора является меньший расход материалов и достаточная общая и местная прочность. Недостатком — меньшие удобства при использовании внутренних отсеков корпуса.

При безнаборной конструкции корпуса полностью отсутствуют балки набора, а часто расставленные переборки служат опорами наружной обшивки [7]. Обшивка безнаборных судов, как правило, имеет большую толщину и более мощное армирование, что влечет за собой увеличение расхода материала при постройке по сравнению с наборной. Основным преимуществом данной системы набора является ее высокая технологичность, особенно при сборном методе постройки [5].

Обоснованный выбор системы набора корпуса во многом определяет эксплуатационно-экономическую эффективность стоечного железобетонного судна. При выборе рациональной системы набора корпуса одним из важных критериев, помимо прочих, является минимизация его строительной стоимости. Существующие на данный момент рекомендации по применению той или иной системы набора при заданной длине корпуса потеряли свою актуальность, так как не учитывают многие современные экономические и технологические факторы. Поэтому для решения обозначенной проблемы на основе математического моделирования был проведен анализ влияния различных систем набора, характера расположения внутренних переборок, технологических и экономических условий предприятия-строителя на величину строительной стоимости железобетонного корпуса в зависимости от его главных размерений.

Моделирование корпуса выполнялось на ЭВМ с использованием специально разработанного для этих целей в среде «С#» программного продукта, позволяющего проводить проектирование конструктивных элементов и расчет строительной стоимости корпуса с заданными главными размерениями, характером расположения внутренних переборок, производственными и экономиче-

скими условиями верфи-строителя. Интерфейс разработанной программы представлен на рис. 1. Проведена проверка адекватности и устойчивости математической модели корпуса. Установлено, что реализованная в программе математическая модель удовлетворяет всем необходимым требованиям и может быть использована для исследовательского проектирования железобетонного корпуса.

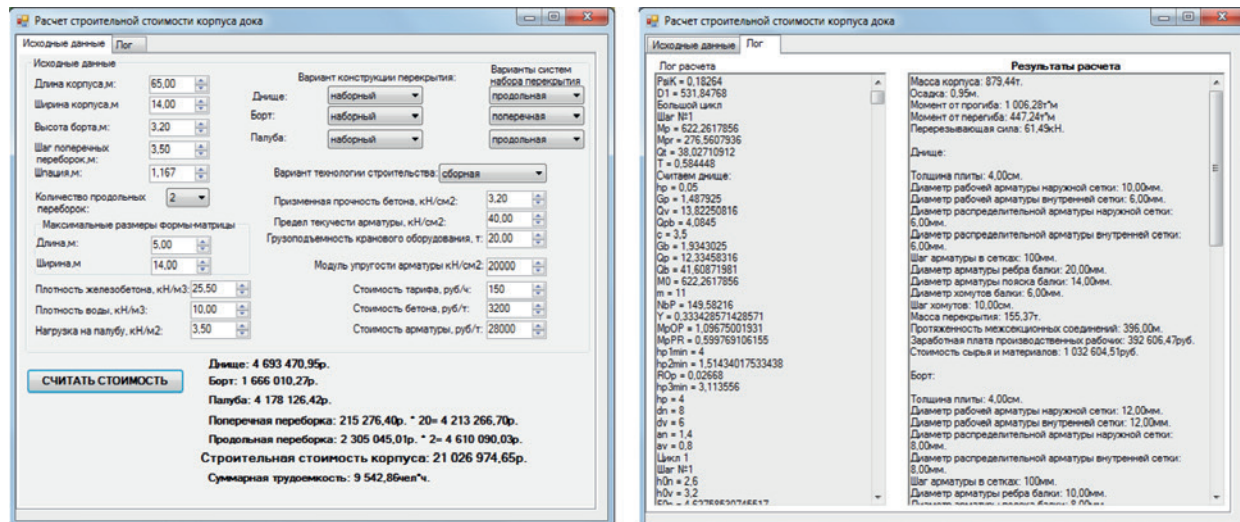


Рис. 1. Интерфейс программы

Особенность данной программы заключается в возможности задания технических характеристик железобетонного корпуса и последующего проектирования его с любым сочетанием систем набора его перекрытий. В ходе выполнения процесса проектирования корпусных конструкций, в автоматическом режиме производится проверка общей и местной прочности и трещиностойкости спроектированных конструктивных элементов. В случае невыполнения условий обеспечения прочности и трещиностойкости проводится корректировка параметров. Помимо этого имеется возможность моделировать различные производственные и экономические условия, сложившиеся на данном предприятии. В качестве исходных данных для расчета строительной стоимости и трудоемкости постройки корпуса используются предварительно определяемые программой параметры основных конструктивных элементов корпусных перекрытий, их масса и протяженность межсекционных соединений, корректируемые в зависимости от технологических особенностей завода-строителя [4].

Исходными данными для определения параметров корпусных перекрытий служат масса корпуса, его осадка, действующая местная и общая нагрузка. Масса железобетонного корпуса, необходимая для нахождения его осадки, в первом приближении рассчитывается по формулам первой группы с использованием измерителей массы ψ_k , полученных в [8]. Полученная в ходе расчета параметров конструктивных элементов корпусных перекрытий в первом приближении масса корпуса, используется для корректировки осадки и действующей на него гидростатической нагрузки. Выполнение приближений по массе зависит от разницы величин массы корпуса предыдущего и последующего приближения, величина которой должна быть не более 5 %.

Определение основных параметров корпусных конструктивных элементов, таких как толщина плит наружной обшивки, геометрические размеры сечений балок набора и параметры их армирования, производится в соответствии с указаниями, изложенными в методике [9]. Усилия в элементах корпуса от расчетных нагрузок определяются принятыми в строительной механике методами. Проверка правильности выполненных расчетов параметров конструктивных элементов корпуса производится в соответствии с указаниями [10]. Расчет прочности конструктивных элементов производится по разрушающим усилиям. Общая прочность корпуса в целом не прове-

ряется, а определяются усилия от общего изгиба в основных продольных связях корпуса, которые затем суммируются с усилиями от местных нагрузок, после чего оценивается прочность каждой из этих связей в отдельности [3].

Строительная стоимость железобетонного корпуса в программе определяется как сумма затрат на строительные материалы, оплату труда производственных рабочих и прочие затраты и накладные расходы. Для расчета затрат на приобретение строительных материалов необходимо более точно определить массу спроектированного корпуса. Масса железобетонного корпуса определяется как сумма масс каждого перекрытия в отдельности. Масса каждого перекрытия рассчитывается на основе полученных параметров его конструктивных элементов по методике [9]. Для определения затрат на оплату труда основных производственных рабочих необходимо найти суммарную трудоемкость постройки корпуса, состоящую укрупненно из трудоемкости изготовления основных корпусных конструкций (плиты обшивки и балки набора), определяемой по нормативам [11], и трудоемкости изготовления межсекционных соединений, определяемой по методике [4].

Для выявления влияния различных конструктивных и технологических факторов на строительную стоимость железобетонного корпуса был проведен численный эксперимент. Варьируемым в ходе проведения эксперимента параметром являлся вариант системы набора корпуса V_n . Заданными величинами являлись длина корпуса L , его ширина B и высота борта H . К постоянным (неизменяемым) величинам относились средняя стоимость нормо-часа производственного рабочего f , производственные (грузоподъемность кранового оборудования P_k) и экономические (стоимость бетона P_b и арматуры P_a) условия предполагаемого предприятия-строителя. В результате выполнения численного эксперимента были найдены величины строительной стоимости при различных значениях варьируемых величин. Возможные варианты решаемых в ходе эксперимента задач приведены в таблице.

Параметры численного эксперимента

№ п/п	Постоянные величины	Переменные величины	Искомые величины
1	$L/B, B/H, f, P_k$	V_n^i	S_i
2	$L/B, B/H, P_k$	V_n^i, f	
3	$L/B, B/H, f$	V_n^i, P_k	

Полученные в ходе численного эксперимента результаты, для удобства их анализа, представлены в виде графической зависимости

$$S_i/S_c = F(L), \quad (1)$$

где S_i — строительная стоимость i -го варианта системы набора корпуса; S_c — строительная стоимость корпуса со смешанной системой набора.

В ходе решения первой задачи численного эксперимента (пп. 1 табл.), при котором варьировались главные размерения корпуса и вариант системы набора, при этом характер расположения внутренних переборок корпуса являлся общепринятым в практике железобетонного судостроения, получены зависимости, представленные на рис. 2 и 3.

Как видно из представленных графиков, для судов длиной до 25 м наиболее рациональной, с точки зрения минимума строительной стоимости, является безнаборная конструкция. При длине корпуса более 25 м меньшую строительную стоимость имеют суда со смешанной системой набора. При этом для относительно небольших судов варьирование системы набора приводит к изменению строительной стоимости на величину не более 2 – 18 %. В то же время для судов длиной более 35 м строительная стоимость корпуса с различными системами набора изменяется на величину 2 – 80 %.

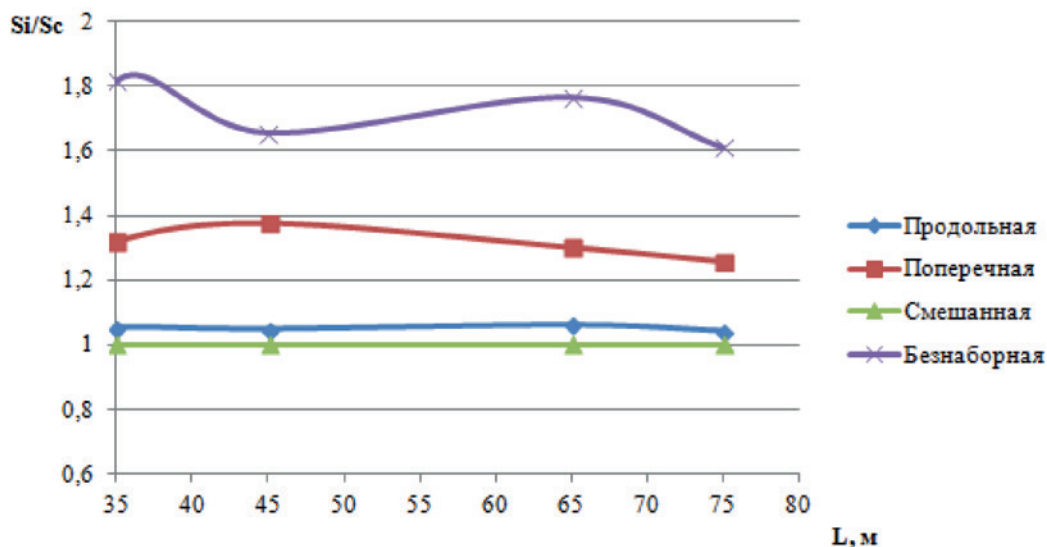


Рис. 2. Зависимость строительной стоимости железобетонного корпуса от системы набора судов длиной более 35 м

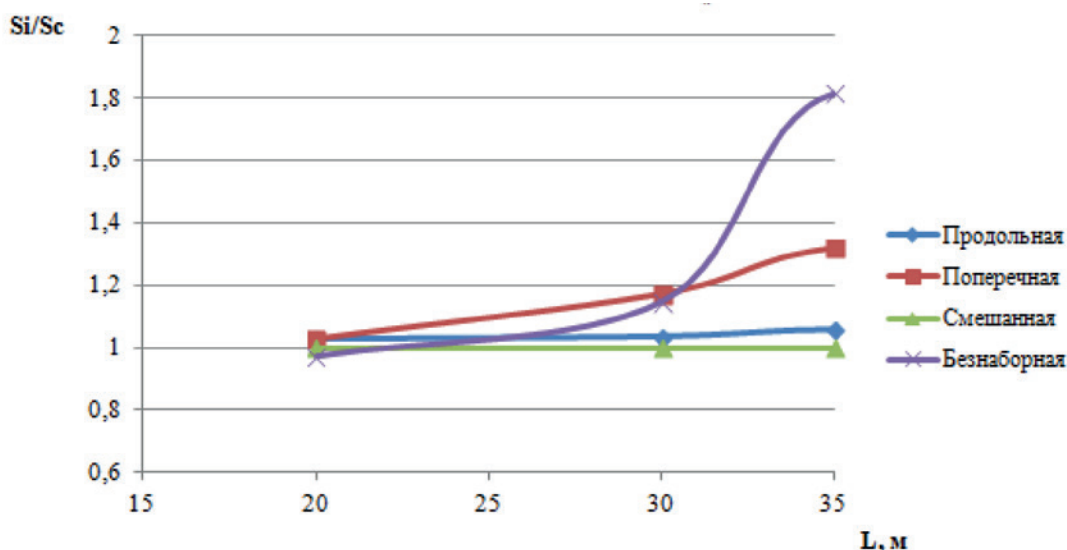


Рис. 3. Зависимость строительной стоимости железобетонного корпуса от системы набора судов длиной до 35 м

Рост строительной стоимости вызван увеличением диаметров рабочей и распределительной арматуры плит при безнаборной конструкции корпуса и диаметра арматуры балок набора перекрытия при поперечной системе набора. Увеличение необходимых диаметров арматуры обусловлено возрастанием действующих на корпусные перекрытия общих и местных нагрузок. В свою очередь, увеличение диаметров арматуры влечет за собой рост затрат на сырье и трудоемкость выполнения арматурных работ. Выраженный скачок величины строительной стоимости в варианте с безнаборной конструкцией при длине корпуса 35 м связан с увеличением шага поперечных переборок с 2,5 до 3,0 м, что является характерным для железобетонных причальных понтонов такой длины и вызванным этим увеличением внутренних усилий в балке-полоске плиты наружной обшивки.

Также, в ходе данного этапа численного эксперимента был смоделирован вариант перспективной смешанной системы набора корпуса, при котором днище имело безнаборную конструкцию, палуба продольную, а борта набраны по поперечной системе. Полученные в результате расчета графические зависимости, представлены на рис. 4.

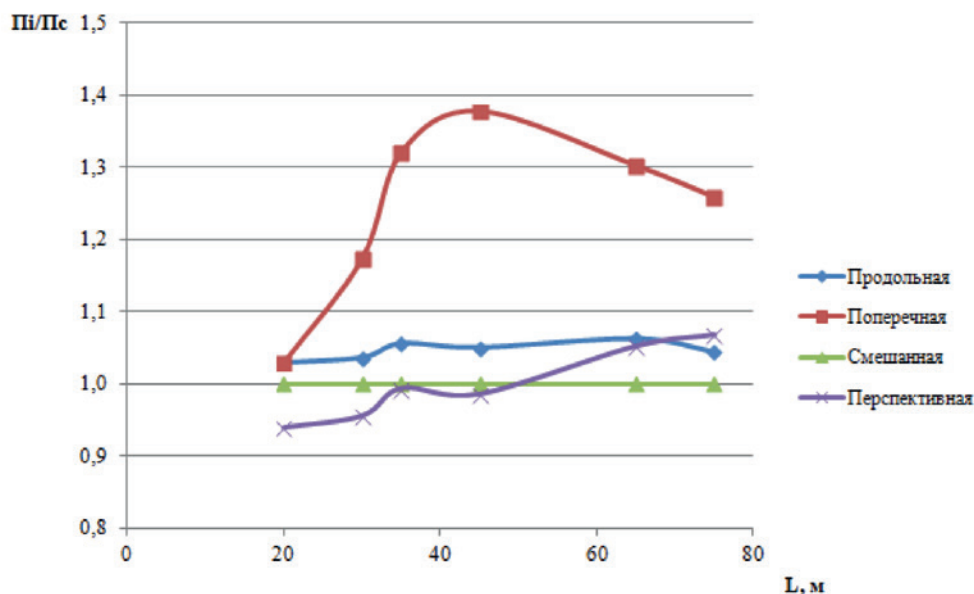


Рис. 4. Зависимость строительной стоимости железобетонного корпуса от системы набора

Из представленного графика видно, что использование смешанной системы набора железобетонного корпуса, при которой днище имеет безнаборную конструкцию, рационально для судов длиной до 50 м. Данная закономерность объясняется меньшей протяженностью межсекционных соединений по днищу и, как следствие, снижением трудоемкости его изготовления [12]. При большей длине судна эта система по строительной стоимости близка к продольной, так как в этом случае происходит увеличение действующих общих изгибающих моментов и, следовательно, размеров поперечных сечений основных продольных связей корпуса, что неминуемо влечет за собой повышение материалоемкости конструкции и строительной стоимости.

В ходе решения второй задачи численного эксперимента (пп. 2 табл.), при котором варьировалась стоимость часового тарифа оплаты труда производственных рабочих f , интерес представляло соотношение строительной стоимости безнаборной конструкции и смешанной системы набора S_o/S_c . Полученные в результате численного эксперимента графические зависимости $S_o/S_c = F(f, L)$ представлены на рис. 5.

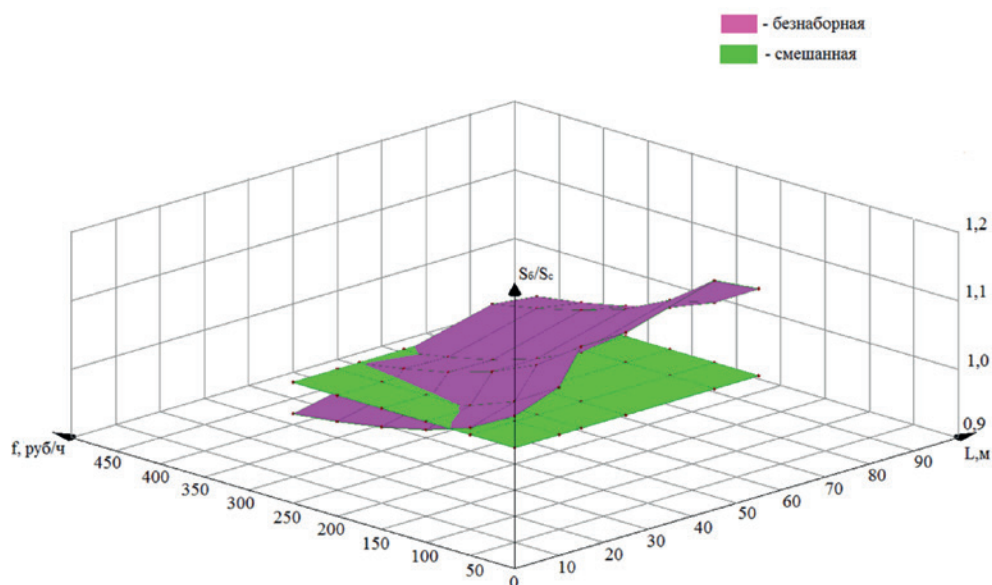


Рис. 5. Зависимость строительной стоимости железобетонного корпуса от стоимости тарифа при различных длинах корпуса

Из представленного графика видно, что с увеличением стоимости часового тарифа оплаты труда область рационального применения безнаборной конструкции увеличивается до длины корпуса 40 м, что обусловлено увеличением доли финансовых затрат на оплату труда в составе строительной стоимости корпуса. А в случае безнаборной конструкции, данная доля затрат составляет меньшую величину в процентном соотношении.

В ходе численного эксперимента также было рассмотрено влияние грузоподъемности кранового оборудования P_k (пп. 3 табл.), обслуживающего корпусное производство верфи. Грузоподъемность кранов в данном случае определяет предельные размеры железобетонных секций в плане, из которых впоследствии собирается корпус. От размеров секций в плане, в свою очередь, зависит протяженность межсекционных соединений перекрытия, собираемого из данных секций и, косвенно, трудоемкость его формирования. Полученные в результате численного эксперимента графические зависимости относительной величины строительной стоимости S_0/S_c от грузоподъемности кранового оборудования представлены на рис. 6.

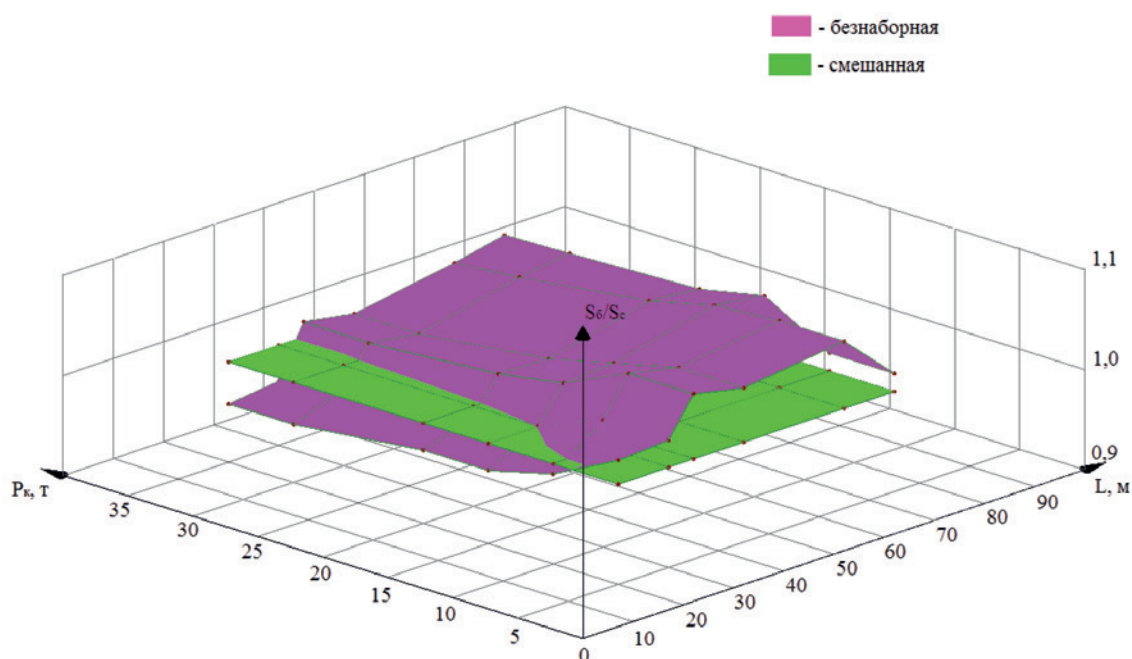


Рис. 6. Зависимость строительной стоимости железобетонного корпуса от грузоподъемности кранового оборудования

Уменьшение границы области рационального применения безнаборной конструкции корпуса с уменьшением грузоподъемности кранового оборудования в данном случае объясняется уменьшением размеров железобетонных секций в плане, что влечет за собой значительное увеличение протяженности межсекционных соединений корпуса [4]. В случае безнаборной конструкции увеличение протяженности соединений оказывает большее влияние на конечную величину строительной стоимости, нежели у смешанной системы набора, ввиду больших диаметров арматурных стержней железобетонных секций, стыкуемых в межсекционных соединениях и, следовательно, больших показателей трудоемкости при выполнении данной операции.

Выводы

1. Для железобетонного корпуса стоечного судна длиной до 25 м с традиционным соотношением главных размерений и характером расположения переборок, рациональной, с точки зрения минимизации строительной стоимости, является применение безнаборной конструкции корпусных перекрытий.

2. Для железобетонного корпуса длиной более 35 м рациональным решением, позволяющим снизить его строительную стоимость за счет снижения расхода основных строительных материалов, является использование смешанной системы набора.

3. Использование поперечной системы набора рационально для железобетонных корпусов судов подвергающихся значительным местным динамическим нагрузкам, а также на судах, с отсеками, вытянутыми вдоль корпуса, например, причальные понтоны для обслуживания пассажирских перевозок. Однако ее применение требует тщательного технико-экономического обоснования.

4. С увеличением стоимости часового тарифа оплаты труда область рационального использования безнаборной конструкции корпуса увеличивается в сторону больших его длин.

5. Использование при изготовлении железобетонных секций и формировании корпуса на верфи кранового оборудования большей грузоподъемности, позволяющего увеличить размеры секций, расширяет область рационального применения безнаборной конструкции корпуса, в пределах которой его строительная стоимость будет минимальной.

6. Применение в практике проектирования железобетонных корпусов предлагаемой перспективной системы набора, отличающейся от смешанной системы днищем безнаборной конструкции, позволит минимизировать их строительную стоимость вплоть до длины 50 м. Применение перспективной системы набора на корпусах длиной до 35 м позволит снизить их строительную стоимость в среднем на 6 – 8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киселев А. А.* Применение современных технологий для инженерных сооружений средств базирования флота / А. А. Киселев // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. — 2014. — № 147. — С. 73–76.
2. *Шехоркина С. Е.* Исследование долговечности железобетонных понтонов, эксплуатируемых на водных объектах Украины / С. Е. Шехоркина, И. Н. Матюшенко, Н. В. Савицкий // Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури. — 2013. — № 1–2. — С. 64–69.
3. *Рашковский А. С.* Модульное формирование композитных плавучих доков / А. С. Рашковский, Д. В. Ермаков, Ди Син // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. — 2014. — № 3 (453). — С. 4–11.
4. *Мишутин Н. В.* Железобетонные плавсооружения и перспективы их использования / Н. В. Мишутин, А. В. Мишутин // Вестник Одесской Государственной академии строительства и архитектуры. — 2002. — № 6. — С. 181–186.
5. *Горохов М. С.* Состояние и направления развития корпусных конструкций судов из железобетона / М. С. Горохов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — С. 67–70.
6. *Волков И. В.* К вопросу снижения затрат при изготовлении корпусов железобетонных судов с поперечной системой набора / И. В. Волков // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — № 51. — С. 153–164.
7. *Горохов М. С.* Трещиностойкость фибробетона со стальной анкерной фиброй / М. С. Горохов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 47–53.
8. *Горохов М. С.* Определение массы корпуса железобетонного стоечного судна на стадии исследовательского проектирования / М. С. Горохов, Е. П. Роннов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 113–119.
9. *Егоров Н. М.* Проектирование элементов корпуса железобетонного судна: учеб. пособие для студентов кораблестроительного факультета / Н. М. Егоров. — Горький: Изд-во ГИИВТ, 1980.
10. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. — М.: ФГУ «Российский Речной Регистр», 2008. — Т. 2. Корпус.
11. Инструкция по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции (работ, услуг) на предприятиях судостроительной отрасли Российской Федерации. — СПб.: ЦНИИ «Румб», 1993.
12. *Пичугин Д. А.* О развитии технологии серобетонного судостроения / Д. А. Пичугин // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2007. — № 2. — С. 114–117.

FEASIBILITY STUDY OF APPLICATION OF DIFFERENT FRAMING SYSTEMS OF REINFORCED CONCRETE HULL

Framing of a hull and its construction technology have significant influence on economic and maintenance aspects of reinforced concrete hull. Main advantages and disadvantages of different systems of reinforced concrete hull framing are disclosed. Existing recommendations for application of this or that framing at a given hull length have lost their vitality in modern economic situation as they do not consider a lot of economic and technological factors. Examination of influence of different framing systems, inner bulkheads distribution, technological and economic conditions of a shipbuilding plant on construction cost of a reinforced concrete hull, taking into consideration its main dimensions, has been carried out by means of a specially worked out computer programme. During the calculation experiment limits of rational application of different hull framing systems have been defined. Suggested is a completely new perspective hull framing system, which minimizes the construction cost.

Keywords: framing system, reinforced concrete hull, construction cost, rate of charge, lifting capacity, calculation experiment, hull length.

REFERENCES

1. Kiselev, O. O. "Application of modern technology for engineering structures of navy basing facilities." *Visnik SevNTU. Seriya: Mekhanika. energetika. ekologiya* 147 (2014): 73-76.
2. Shekhorkina, S. E., I. N. Matyushenko, and N. V. Savytskyi. "Issledovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh pontonov, jekspluatiruemykh na vodnykh obektah Ukrainy." *Bulletin of Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture* 1-2 (2013): 64-69.
3. Rashkovskiy, A. S., D. V. Ermakov, and Di Sin. "Modular formation of composite floating docks." *Collection of Scientific Publications* 3(453) (2014): 4-11.
4. Mishutin, N. V., and A. V. Mishutin. "Concrete floating structures and prospects of their use." *Vestnik Odesskoy Gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arhitektury* 6 (2002): 181-186.
5. Gorohov, M. S. "Status and Trends of hull structures of reinforced concrete ships." *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* 35 (2013): 67-70.
6. Volkov, I. V. "To the question of lowering the expenditures during the construction of hulls of reinforced concrete ships with transverse system of framing." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 51 (2010): 153-164.
7. Gorohov, M. S. "Cracking resistance of fiber reinforced concrete with steel anchor fiber." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 47-53.
8. Ronnov, E. P., and M. S. Gorohov. "Definition of the mass of reinforced concrete stationary vessel hull at the stage of research designing." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 113-119.
9. Egorov, Nikolay Mihaylovich. *Proektirovanie elementov korpusa zhelezobetonного судна. Uchebnoe posobie dlya studentov korablestroitel'nogo fakulteta*. Gorkiy: GIIVT, 1980.
10. *Russian River Register. Rules. Volume.2. Hull*. M.: FGU "Russian River Register", 2008.
11. *Instrukciya po planirovaniyu, uchetu i kalkulirovaniyu sebestoimosti produkcii (rabot, uslug) na predpriyatiyah sudostroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federacii*. SPb.: CNII "Rumb", 1993.
12. Pichugin, D. A. "On development of sulfur-concrete shipyard engineering." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University* 2 (2007): 114-117.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Горохов Михаил Сергеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Роннов Евгений Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
mahailo@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gorohov Mikhail Sergeevich - postgraduate.
Supervisor:
Ronnov Evgenij Pavlovich -
Dr. of Technical science, professor.
Volga state university of water transport
mahailo@mail.ru

КОРРЕКТИРОВКА ОПОРНОГО ОСНОВАНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ БУРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

В статье рассматриваются вопросы, связанные с операциями и требованиями по точности при установке стационарных буровых платформ в Каспийском море. Приведены технические характеристики японского электронного тахеометра Nikon, назначение и основные характеристики стационарной буровой платформы «Жданов-А», Большое внимание в статье уделяется требованию и корректировке по вертикали опорного основания стационарной буровой платформы с помощью тахеометра Nikon. По результатам измерений тахеометром можно сделать вывод, что стационарная буровая платформа «Жданов-А» установлена с надлежащей точностью. Практические результаты установки стационарной буровой платформы «Жданов-А» показывают, что применение электронных тахеометров вообще и тахеометра Nikon в частности позволяет решить проблему точности монтажа буровых платформ, уменьшает трудоемкость работ и повышает конкурентоспособность компаний-исполнителей работ.

Ключевые слова: тахеометр Nikon, стационарная буровая платформа «Жданов-А», Каспийское море, корректировка, измерение.

ГЛАВНЫМ богатством Каспия сегодня считают нефть и газ. Доказанные запасы нефти в российском секторе Каспия — 2,95 млрд т, природного и нефтяного газа — 3,1 трлн м³ [1] – [3]. Подготовка к технологической разработке месторождений шельфа Каспия имеет немало трудностей. Одним из них является проверка горизонта и вертикальности опорных оснований (джекетов) при установке стационарных буровых платформ. В настоящее время практический опыт показывает, что тахеометры помогают решать эту проблему. Они позволяют производить не только угловые, но и линейные измерения, способствуют повышению точности измерений, обеспечивают первоначальную числовую обработку результатов на месте измерений благодаря наличию встроенного в тахеометр вычислительного устройства [4] – [10].

В табл. 1 показаны некоторые технические характеристики тахеометра Nikon [11], применяющегося при проверке установки опорных оснований стационарных буровых платформ в Каспийском море.

Таблица 1

Технические характеристики тахеометра Nikon NPL362

Точность угловых измерений	3 секунды
Увеличение зрительной трубы	26 / 32 раза с дополнительными окулярами
Точность линейных измерений	3 мм + 2 мм/км (с отражателем) 5 мм + 2 мм/км (без отражателя)
Дальность линейных измерений (одна призма)	5000 м
Дальность линейных измерений (без отражателя)	200 м
Время одного измерения с отражателем	1,6 с; инициализация 2,6 с (NPL-362)
Время одного измерения без отражателя	1,6 с; инициализация 3,5 с
Объем встроенной памяти	10000 точек

В настоящей статье приведена методика и результаты измерения положения двух из трёх опорных оснований (джекетов) стационарной буровой платформы «Жданов-А», выполненные астраханской фирмой «Крейн Марин Контрактор». Платформа установлена в южной части Ка-

спийского моря в туркменском секторе. Её назначение — бурение 16 скважин буровой бригадой численностью 90 человек в период бурения и временное проживание восьми человек персонала в период эксплуатации скважин.

Морская стационарная платформа «Жданов-А» состоит из устьевой платформы, опирающейся на два отдельных джекета, и жилой платформы, опирающейся на один джекет (см. ситуационный план на рис. 1 и общий вид на рис. 2). Платформы соединены переходным мостом длиной 50 м. Джекеты и платформы состоят из трубчатых блоков ферменной конструкции (см. рис. 2). Верхнее строение каждой платформы сформировано из двух открытых палуб: дренажной и главной, соединенных стойками и раскосами из труб.

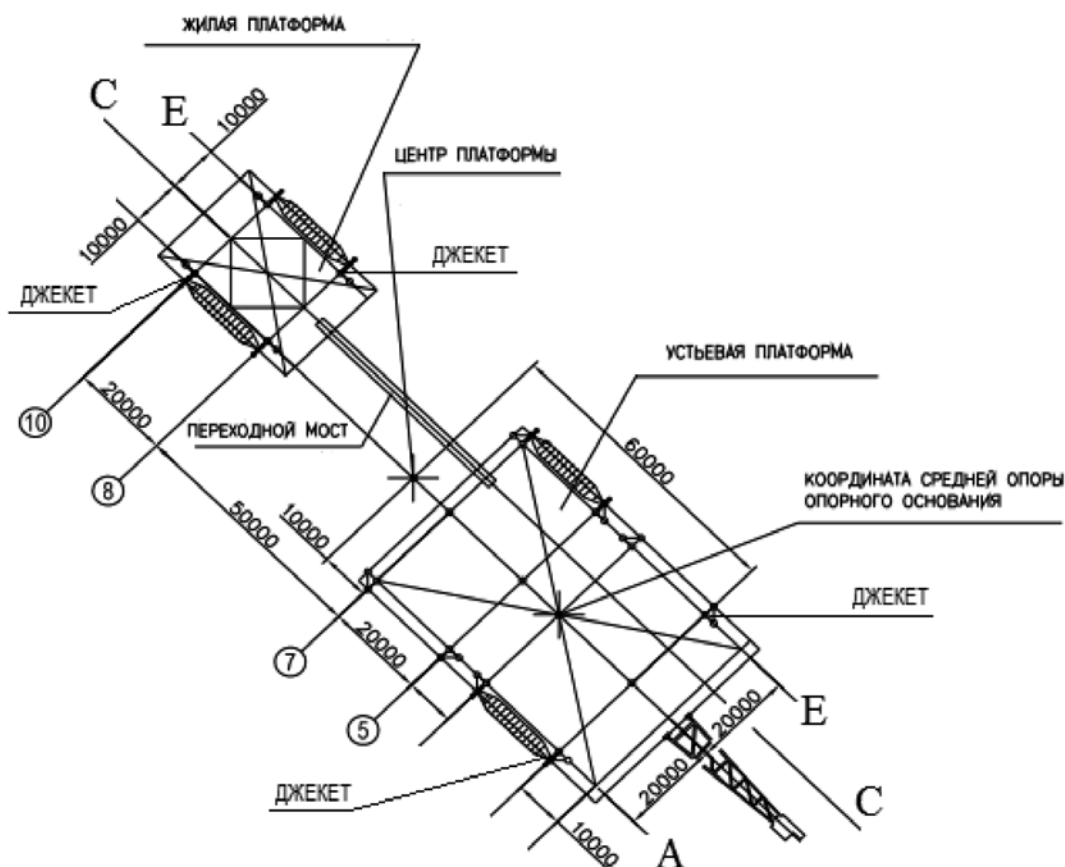


Рис. 1. Ситуационный план платформы «Жданов-А»

Главные размеры устьевой платформы, м [12]:

- опорное основание $L \times B \times H$: $50,0 \times 40,0 \times 29,6$;
- верхнее строение $L \times B \times H$: $65,0 \times 45,0 \times 6,3$.

Главные размеры жилой платформы, м:

- опорное основание $L \times B \times H$: $20,00 \times 20,00 \times 30,3$;
- верхнее строение $L \times B \times H$: $35,0 \times 25,0 \times 6,3$.

Все операции, выполняемые во время установки джекетов, устьевой и жилой платформ, можно разделить на следующие этапы:

- навигационное обеспечение водолазных работ во время обследования района установки опорных оснований и мест отдачи якорей плавкрана «Волгарь» и транспортных барж;
- позиционирование транспортно-буксировочного судна во время установки якорных линий;
- навигационное обеспечение работ при постановке плавкрана «Волгарь» на якоря;
- навигационно-геодезическое обеспечение работ по установке джекетов;
- определение отклонений горизонтального плана и вертикальности джекетов;

- проверка горизонтальности палуб верхних строений.

Требования к монтажу опорных оснований:

- центры опорных оснований должны находиться в пределах 3 м от точки, указанной на ситуационном плане (см. рис. 1);

- пространственная ориентация опорных оснований по вертикали должна быть в пределах $\pm 1,0$ град. от значения, указанного в чертежах;

- опорные основания устьевой платформы должны монтироваться таким образом, чтобы отклонение горизонтального плана верхней диафрагмы находилось в пропорции 1 : 250;

- опорное основание жилой платформы должно монтироваться таким образом, чтобы отклонение горизонтального плана верхней диафрагмы находилось в пропорции 1 : 200.



Рис. 2. Общий вид платформы «Жданов-А»

Палубы должны монтироваться на отметках, указанных в чертежах, с допуском ± 25 мм, а их выравнивание в горизонт допускает отклонение в пропорции 1 : 1000.

После установки джекетов на дно моря плавкраном «Волгарь» производилась забивка в грунт цилиндрических свай через трубчатые стаканы с воронкой (кронштейны), закреплённые на нижней части джекетов (см. рис. 2). Затем выполнялся контроль вертикальности джекетов и горизонта верхней части опорных оснований методом тригонометрического нивелирования с помощью электронного тахеометра Nikon NPL 362. Этот метод позволяет определить разности высот точек по измеренному углу наклона и длине наклонной линии визирования. По результатам нивелирования были определены превышения углов опорных оснований в плоскости верхней диафрагмы. Для выполнения тригонометрического нивелирования электронный тахеометр устанавливался на мостках опорных оснований в плоскости верхней диафрагмы в точках, наиболее подходящих для установки прибора. Веха с призмой устанавливалась на верхнюю диафрагму опорных оснований по углам конструкции.

Для каждого определения горизонта выполнялась серия из 10 промеров. Результаты определения вертикальности джекетов и горизонта опорных оснований представлены в табл. 2 – 5. Было установлено, что оба джекета устьевой платформы отклонились от вертикали (рис. 3), что было необходимо исправить. Это было выполнено подъёмом углов джекетов плавкраном «Волгарь». Окончательно закрепление джекетов производилось гидроразжимом свай в опорных стаканах. На рис. 4 показана установка гидроразжима свай в направляющей. Проверка горизонта опорных оснований стационарной буровой платформы «Жданов-А» выполнялась после забивки свай и до обрезки верхней части опор перед установкой верхних строений.

Порядок фиксации джекета:

- 1) определение самой низкой точки по углам джекета;

- 2) подъём самого низкого угла джекета до уровня самого высокого угла;
- 3) проверка тахеометром самого низкого угла джекета до необходимого уровня;
- 4) если замеры — в пределах допуска, то свая развальцовывается внутри стакана, чем джекет закрепляется к свае окончательно;
- 5) такие же операции повторяются с остальными углами джекета.

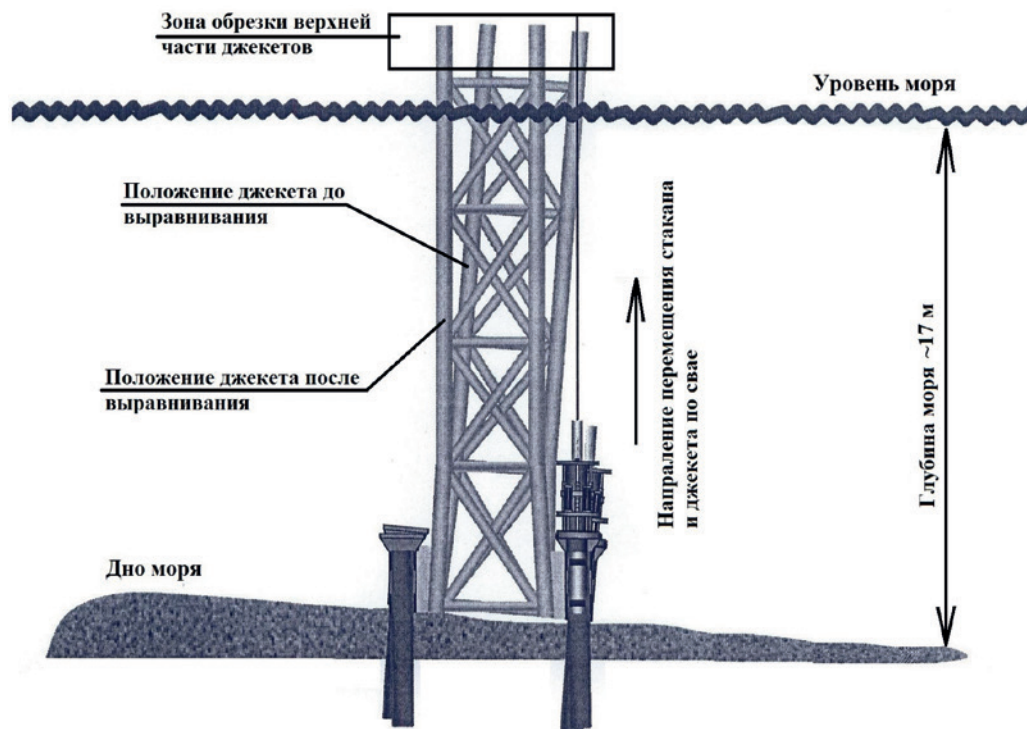


Рис. 3. Схема выравнивания джекета в сечениях 5 и 7 на рис. 1

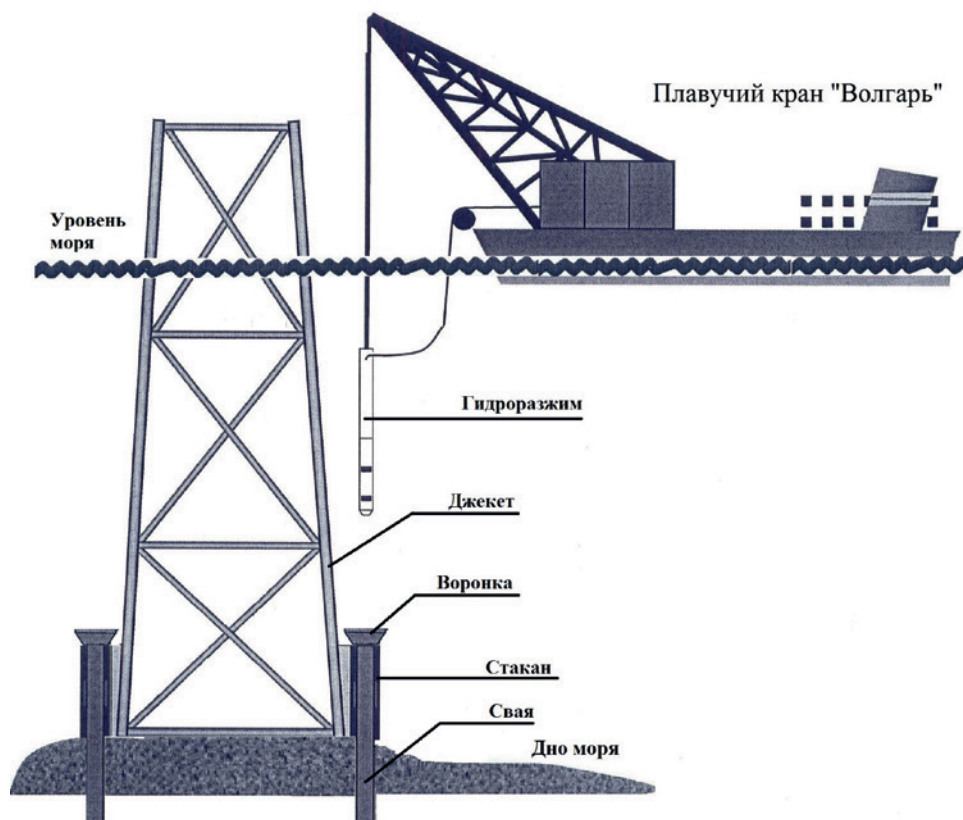


Рис. 4. Опускание гидроразжима в сваю через направляющую воронку и стакан

Таблица 2

**Результаты контроля вертикальности и горизонта опорных оснований
в точках E8, C8, C10 и E10 в первом наблюдении**

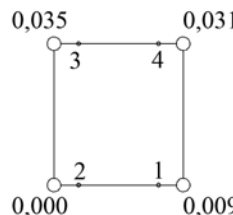
			Высота инструмента, м		1,68
			Высота вехи / марки, м		1,49
			Длина базиса (1 – 2, 3 – 4), м		18,60
			Расстояние от марки до центра опоры, м		0,70
			Длина базиса (1 – 4, 2 – 3), м		20,00
Крен, град.					
C10-E10	C8-E8	Среднее			
–0,01	0,01	0,00			
Дифферент, град.					
C10-E10	C8-E8	Среднее			
–0,10	–0,06	–0,08			

Таблица 3

**Результаты контроля вертикальности и горизонта опорных оснований
в точках E8, C8, C10 и E10 после выравнивания джекета 2**

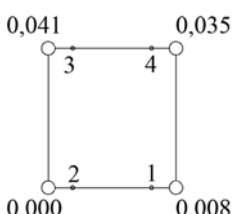
			Высота инструмента, м		1,67
			Высота вехи / марки, м		1,49
			Длина базиса (1 – 2, 3 – 4), м		18,60
			Расстояние от марки до центра опоры, м		0,70
			Длина базиса (1 – 4, 2 – 3), м		20,00
Крен, град.					
C10-E10	C8-E8	Среднее			
-0,01	0,01	0,00			
Дифферент, град.					
C10-E10	C8-E8	Среднее			
-0,12	-0,08	-0,10			

Таблица 4

**Результаты контроля вертикальности и горизонта опорных оснований
в точках E5, A5, A7 и E7 в первом наблюдении**

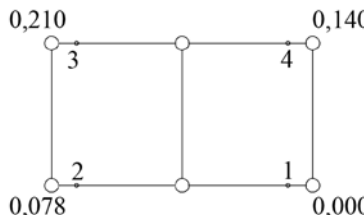
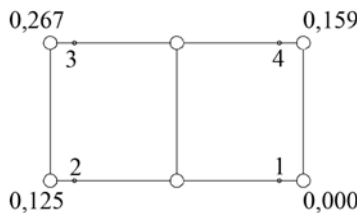
			Высота инструмента, м		1,60
			Высота вехи / марки, м		1,49
			Длина базиса (1 – 2, 3 – 4), м		37,60
			Расстояние от марки до центра опоры, м		1,20
			Длина базиса (1 – 4, 2 – 3), м		20,00
Крен, град.					
A7-E7	A5-E5	Среднее			
-0,10	-0,11	-0,11			
Дифферент, град.					
A7-A5	E7-E5	Среднее			
-0,38	-0,40	-0,39			

Таблица 5

**Результаты контроля вертикальности и горизонта опорных оснований
в точках E5, A5, A7 и E7 во втором наблюдении**

			Высота инструмента, м		1,72
			Высота вехи/марки, м		1,49
			Длина базиса (1 – 2, 3 – 4), м		37,60
			Расстояние от марки до центра опоры, м		1,20
			Длина базиса (1 – 4, 2 – 3), м		20,00
Крен, град.					
A7-E7	A5-E5	Среднее			
–0,16	–0,18	–0,17			
Дифферент, град.					
A7-A5	E7-E5	Среднее			
–0,41	–0,45	–0,43			

По результатам измерений тахеометром можно сделать вывод, что стационарная буровая платформа «Жданов-А» установлена с надлежащей точностью.

Выводы

Подводя итоги всему сказанному, мы пришли к следующим выводам:

1. Проверка горизонта и вертикальности опорных оснований является одним из трудоемких этапов при монтаже стационарных буровых платформ.
2. Применение тахеометров и новых систем измерений является современным подходом для решения задач по точности изготовления платформ, их монтажа, включая все поверочные работы.
3. Практические результаты установки стационарной буровой платформы «Жданов-А» в Каспийском море показывают, что она установлена с надлежащей точностью, и применение электронных тахеометров вообще и тахеометра Nikon в частности позволяет уменьшать трудоемкость работ и повышает конкурентоспособность компаний – исполнителей работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россия оценила запасы нефти и газа на Каспии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://lenta.ru/news/2011/05/04/value/> (дата обращения: 04.05.2011).
2. Семенова Н. К. Развитие евроазиатского энергетического рынка в условиях региональных и вне-региональных политических рисков / Н. К. Семенова // Восточная аналитика. — 2011. — № 2. — С. 131–138.
3. Ахмадов Эльшан Ниязи Оглу Экономические отношения России и Азербайджана на современном этапе: дис. ... канд. экон. наук / Эльшан Ниязи Оглу Ахмадов. — М., 2011. — 183 с.
4. Теоретические основы применения лазерных тахеометров в измерительной системе, привязанной к корпусу судна / В. Н. Блащук, И. А. Бунов, Минь Шон Хоанг, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 2. — С. 13–19.
5. Лубенко В. Н. Анализ возможности применения тахеометров для контроля проверочных работ при сборке корпусов судов / В. Н. Лубенко, С. С. Трофимова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 25–29.
6. Нгуен Чунг Ань. Контроль положения поперечных переборок судна в пространстве с помощью тахеометра 3Та5Р6 / Чунг Ань Нгуен, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2013. — № 2. — С. 46–50.
7. Нгуен Чунг Ань. Контроль положения плоских секций судна в пространстве с помощью тахеометра 3Та5Р6 / Чунг Ань Нгуен, В. Н. Лубенко // Морские интеллектуальные технологии. — 2014. — Т. 2. — № 1 (23). — С. 22–26.

8. Боронина Н. П. Исследование точности резки листовых деталей корпусов судов с помощью тахеометра / Н. П. Боронина, Чунг Ань Нгуен, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 2. — С. 7–13.

9. Нгуен Чунг Ань. Применение тахеометров в судостроении — принцип измерения и пересчета координат / Чунг Ань Нгуен, Н. П. Боронина, В. Н. Лубенко // Современный научный вестник. Серия: Технические науки. — 2014. — № 7 (203). — С. 133–139.

10. Нгуен Чунг Ань. Использование датчиков тахеометра в системах контроля качества работ в судостроении / Чунг Ань Нгуен, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2014. — № 2. — С. 52–57.

11. Nikon DTM-362/NPL-362. Total Station [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.coudere.be/downloads/producten/Technische%20gegevens%20Nikon%20NPL362.pdf> (дата обращения: 03.03.2014).

12. АСПО построило морскую стационарную платформу [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.i-mash.ru/news/nov_predpr/27964-aspo-postroilo-morskuju-stacionarnuju-platformu.html (дата обращения: 14.11.2012).

THE ADJUSTMENT OF THE SUPPORT BASE OF THE STATIONARY DRILLING PLATFORM IN THE CASPIAN SEA

The article discusses issues related to operations and the accuracy requirements when installing stationary drilling platform in the Caspian Sea. Introducing the technical characteristics of the Japanese electronic tachometer Nikon, purposes and the basic characteristics of the stationary drilling platform "Zhdanov-A", performed by the Astrakhan company "Crane Marine Contractor". The attention is paid to the requirements and the vertical correction of supporting base of stationary drilling platform in the Caspian Sea using the tachometer NIKON. The results of measurements tachometer can conclude that the stationary drilling platform "Zhdanov-A" is installed with proper precision. Practicably, the results of the installation stationary drilling platform "Zhdanov-A" indicates that the use of total stations in general and in particular the Nikon total station allows us to solve the problem of the accuracy of the installation of drilling platforms, reduces the volume of work and increase the competitiveness of companies - executors of works.

Keywords: tachometer Nikon, stationary drilling platform "Zhdanov-A", Caspian Sea, correction, measurement.

REFERENCES

1. Rossiya ocenila zapasy nefti i gaza na Kaspii. Web. 4 May 2015 <<http://lenta.ru/news/2011/05/04/value/>>.
2. Semenova, N. K. "Razvitie evroaziatskogo jenergeticheskogo rynka v uslovijah regionalnyh i vneregionalnyh politicheskikh riskov." *Eastern analytics* 2 (2011): 131-138.
3. Ahmadov, Jelshan Nijazi Oglu. Jekonomicheskie otnoshenija Rossii i Azerbajdzhana na sovremennom jetape: the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of economic Sciences. M., 2011.
4. Blashchuk, V. N., I. A. Bunov, Minh Son Hoang, and V. N. Lubenko. "Theoretical bases of laser tachometers application in the measurement system attached to the hull of the vessel." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2011): 13-19.
5. Lubenko, V. N., and S. S. Trofimova. "Analysis of the possibility of tachometers application for controlling test works at ship hull adjusting." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 25-29.
6. Nguyen, Trung Anh, and V. N. Lubenko. "Control of the ship transverse bulkheads position in space using tachometer 3Ta5P6." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2013): 46-50.
7. Nguyen, Trung Anh, and V. N. Lubenko. "Control of the position of the flat sections in the space of ships by means tachometer 3Ta5P6." *Marine intellectual technologies* 2.1(23) (2014): 22-26.
8. Boronina, N. P., Trung Anh Nguyen, and V. N. Lubenko. "Study of accuracy of cutting of plate details of ship hull using tachometer." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2014): 7-13.
9. Nguyen, Trung Anh, N. P. Boronina, and V. N. Lubenko. "Primenenie taheometrov v sudostroenii – princip izmerenija i perescheta koordinat." *Sovremennyy nauchnyj vestnik. Serija: Tehnicheskie nauki* 7(203) (2014): 133-139.

10. Nguyen, Trung Anh, and V. N. Lubenko. "Use of tacheometer sensors in quality control systems in shipbuilding." // *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, Computer Science and Informatics* 2 (2014): 52-57.
11. Nikon DTM-362/NPL-362 Total Station. Web. August 2008 <<http://www.coudere.be/downloads/producten/Technische%20gegevens%20Nikon%20NPL362.pdf>>.
12. ASPO postroilo morskiju stacionarnuju platformu. Web. 14 Nov. 2012 <http://www.i-mash.ru/news/nov_predpr/27964-aspo-postroilo-morskiju-stacionarnuju-platformu.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Чунг Ань — аспирант.
Научный руководитель:
Рубан Анатолий Рашидович
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
astrakhan.nta58@gmail.com
Рубан Анатолий Рашидович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
a.ruban1974@mail.ru
Лубенко Владимир Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
dr_lubenko@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen, Trung Anh — postgraduate.
Supervisor:
Ruban Anatolij Rashidovich
FSBEI HPE "ASTU"
astrakhan.nta58@gmail.com
Ruban Anatolij Rashidovich —
PhD, associate professor.
FSBEI HPE "ASTU"
a.ruban1974@mail.ru
Lubenko Vladimir Nikolaevich —
Dr. of Technical science, professor.
FSBEI HPE "ASTU"
dr_lubenko@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 7 октября 2015.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.436

О. К. Безюков,
В. А. Жуков,
К. А. Воробей

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Статья посвящена оценке энергетического и экологического эффекта, полученного в результате использования в судовых энергетических установках газопоршневых двигателей. Приведена сравнительная характеристика газомоторных топлив, проанализирован опыт их использования на водном транспорте. Для двигателя ТМЗ-8481, конвертированного в судовую, выполнены расчеты показателей рабочего цикла и состава отработавших газов при использовании различных видов топлива. Показана перспективность применения газопоршневых двигателей внутреннего сгорания в условиях ужесточения экологических требований к судовым энергетическим установкам. Сформулированы задачи, требующие решения при внедрении газопоршневых двигателей внутреннего сгорания на водном транспорте. Для достижения максимального энергетического и экологического эффекта необходима комплексная модернизация основных систем газопоршневых двигателей: топливоподачи, наддува, охлаждения, автоматического регулирования, обеспечение безопасности судовых энергетических установок с газопоршневыми двигателями. Отмечается, что сокращение затрат, связанных с внедрением газопоршневых двигателей, может быть обеспечено за счет совершенствования проектирования и эксплуатации газопоршневых двигателей и максимального использования инфраструктуры, созданной для наземного транспорта, работающего на газовом топливе.

Ключевые слова: газовое топливо, газопоршневые двигатели, энергетические показатели, экологические требования, состав отработавших газов, безопасность эксплуатации.

АКТУАЛЬНОСТЬ проблемы использования газопоршневых двигателей (ГПД) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) обусловлена двумя факторами: стремлением сократить потребление топлив нефтяного происхождения и необходимостью повышения экологической безопасности СЭУ. Влияние выбросов СЭУ на глобальное состояние воздушного бассейна является ограниченным, составляя 5 – 7 % от общего количества выбросов вредных веществ стационарными энергетическими установками и наземными транспортными средствами [1]. Однако, из-за большой агрегатной мощности, судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) могут являться основными источником загрязнения атмосферы в таких локальных зонах, как порты, гидротехнические сооружения, акватории рек в черте города. Эмиссия токсичных соединений и твердых частиц с отработавшими газами регламентирована российскими и международными стандартами (Euro, IMO, TA-Luft, Tier). В ближайшие годы следует ожидать ужесточения экологических требований к поршневым ДВС, прежде всего, по содержанию в отработавших газах оксидов азота NO_x , снижение выбросов которых является одной из актуальных задач современного судового двигателестроения.

Наряду с ужесточением существующих норм вводятся ограничения на выбросы парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода (CO_2). Вступившая в силу в 1994 г. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (UNFCCC) и Киотский протокол 1997 г. установили обязательства для стран-участниц в отношении снижения выбросов CO_2 . В период 2008 – 2012 гг. развитые страны должны были сократить выбросы парниковых газов как минимум на 5 %. Установленные требования фактически означают необходимость принятия следующих мер: снижение расхода топлива, которое неизбежно приведет к эквивалентному снижению выбросов с ОГ про-

дуктов неполного сгорания топлива (сажи, углеводородов, оксидов углеводородов, бенз(а)пирена, формальдегида); использование новых источников энергии; применение альтернативных топлив. В соответствии с требованиями Приложения VI МК МАРПОЛ 73/78 происходит планомерное ужесточение требований к содержанию оксидов серы, азота и углерода, а также твердых частиц в выбросах морских судов [2].

Перспективными газообразными топливами следует считать природный газ и альтернативные топлива, представляющие собой химические соединения, не являющиеся продуктами переработки нефти. Сравнительный анализ различных видов альтернативных топлив для судовых энергетических установок с точки зрения токсичности отработавших газов выполнен в работе [3], в которой с учетом особенностей хранения и использования различных газообразных топлив сделан вывод о наибольшей перспективности природного газа.

К перспективным и альтернативным топливам в настоящее время относят природный газ — метан (CH_4), водород (H_2), биогаз на основе метана, сжиженные углеводородные газы: пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}). Задача снижения выбросов вредных веществ может быть также решена за счет использования в составе СЭУ двухтопливных двигателей, конструкции которых представлены в работах [1], [4].

Для водного транспорта расширение применения природного газа представляется наиболее вероятным. Использование водорода и биогаза с учетом объемов их производства и особенностей получения может рассматриваться лишь в отдаленной перспективе. Известно, что природный газ на 98 – 99 % состоит из метана. Исходя из этого, были определены [4] массовые доли компонентов продуктов сгорания (табл. 1), количества отработавших газов и диоксида углерода в них на 100 кВт мощности двигателя (табл. 2) при полном сгорании топлива.

Таблица 1

Состав продуктов сгорания различных видов топлива

Топливо	Элементарный состав		Массовые доли			
	С	Н	g_{CO_2}	$g_{\text{H}_2\text{O}}$	g_{N_2}	g_{O_2}
Дизельное	0,872	0,128	0,0700	0,0352	0,7424	0,1484
Природный газ (метан)	0,75	0,25	0,0512	0,05162	0,748	0,149

Таблица 2

Количество отработавших газов и CO_2 на 100 кВт мощности

Топливо	Количество отработавших газов, кг/ч	Количество CO_2 , кг/ч
Дизельное	1015,128	71,94
Природный газ (метан)	1028,3	52,67

Характерной особенностью газовых топлив является повышенное по сравнению с традиционными углеводородными топливами соотношение *водород — углерод* (табл. 3), что обеспечивает более высокое качество рабочего процесса и экологическую чистоту продуктов сгорания.

Таблица 3

Соотношение *водород — углерод* для различных видов топлива

Топливо	Химическая формула	Соотношение Н/С
Метан	CH_4	4,0
Пропан	C_3H_8	2,7
Бутан	C_4H_{10}	2,5
Бензин	C_mH_n	2,0
Дизельное топливо	C_mH_n	1,8
Мазут	C_mH_n	1,7

Проведенное сравнение табличных данных показывает, что применение в качестве топлива для ДВС природного газа обеспечивает существенное сокращение количества вредных выбросов по сравнению с использованием топлив на основе нефти: полностью исключаются выбросы серы, кардинально (на 90 %) снижаются выбросы оксидов азота (NO_x), снижение выбросов парниковых газов на эквивалентную мощность составляет 25 – 30 %, что является дополнительным аргументом в пользу перевода судовых двигателей на газовое топливо в свете современных экологических требований ИМО.

Двигатели на природном газе классифицируют по признакам, приведенным в табл. 4 [5].

Таблица 4

Классификация двигателей на природном газе

Двигатели, работающие на природном газе		
По способу смесеобразования	По типу воспламенения топливно-воздушной смеси	По принципу регулирования
Двигатели с внешним смесеобразованием	Газовые двигатели с принудительным воспламенением от электрической искры	Двигатели с количественным регулированием
Двигатели с внутренним смесеобразованием регулированием (раздельная подача газа и воздуха в цилиндрах)	Газовые двигатели с форкамерно-факельным зажиганием	Двигатели с качественным регулированием
	Газодизели с самовоспламенением от запальной дозы дизельного топлива	Двигатели со смешанным регулированием

Используются два принципиально различных способа перевода дизельных двигателей на питание газовым топливом.

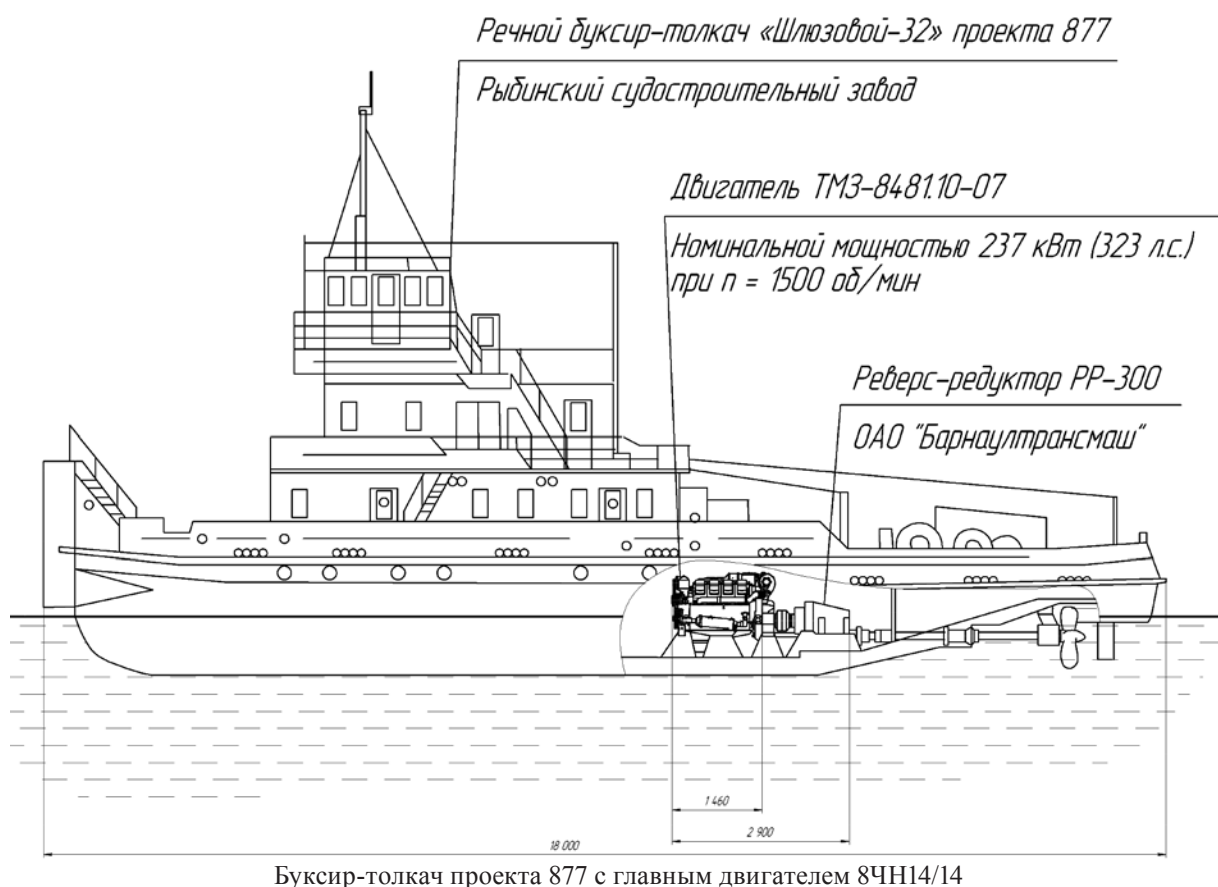
1. *Конвертация дизельного двигателя в двигатель внутреннего сгорания с воспламенением газовой смеси от искры* (полное замещение топлива). Данный способ является достаточно радикальным и связан со значительным изменением конструкции базового двигателя. При этом с двигателя демонтируют дизельную топливную аппаратуру, уменьшают степень сжатия до 11 – 16 единиц, устанавливают систему зажигания, топливоподающую газовую систему. В результате двигатель работает на газовом топливе, которое имеет стоимость ниже, чем дизельное топливо. Экологические параметры отработавших газов конвертированного дизеля, как правило, выше исходного двигателя. При работе с использованием данного способа обеспечиваются номинальные мощности с незначительным снижением КПД с базовым двигателем. После выполнения конвертации двигатель уже не может больше работать на дизельном топливе.

2. *Использование газодизельного режима*. В газодизельном режиме в двигатель подают два топлива: основное дизельное (но в меньшем количестве, чем в базовом), дополнительное газовое (топливо для замещения). При этом основное дизельное топливо играет роль «запальной» дозы для воспламенения интегральной газовой смеси. Существенным преимуществом газодизельного цикла является то, что мощность источника зажигания в нем значительно больше, чем в двигателе с искровым зажиганием. Кроме того, рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда. Благодаря этому одной из важных особенностей газодизельного процесса является возможность надежной работы двигателя на обедненной рабочей смеси. При использовании данного способа сохраняется возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно. У быстроходных дизельных двигателей расход жидкого топлива, используемого для воспламенения и полного сгорания газовой смеси, составляет 10 – 20 % количества, расходуемого при обычном дизельном процессе. В средне- и малооборотных двигателях требуется лишь 5 – 8 % дизельного топлива для воспламенения. В настоящее время существуют опытные модели двигателей, использующие 1 % пилотного топлива, и ведутся работы по дальнейшему уменьшению его количества. Именно такой способ воспламенения реализован

фирмой Wärtsilä в двухтопливном двигателе 20DF, а также двигателях, разработанных фирмой MAN Diesel & Turbo для СЭУ [6] и получивших одобрение классификационных обществ [7].

Опыт использования газового топлива на морском и речном транспорте как в нашей стране, так и за рубежом проанализирован в работах [8], [9]. На основе анализа сделан вывод о том, что внедрение газа на речном флоте следует рассматривать как одну из важнейших государственных задач, направленных на повышение экономической эффективности эксплуатации судов и обеспечение экологической безопасности. При этом наиболее рациональным следует считать переоборудование выпускаемых в России дизелей для работы на газовом топливе.

Объектом исследований при оценке экономической эффективности перевода на газовое топливо, основным компонентом которого является метан, был выбран двигатель 8ЧН14/14 производства ОАО «Тутаевский моторный завод» (ТМЗ-8481.10-07). Двигатель проектировался как автотракторный для использования в сельскохозяйственной и военной технике, однако он имеет хорошие перспективы для конвертации в судовой [10] технике, прошел необходимую модернизацию [11], получил одобрение Российского речного регистра и используется в качестве главного двигателя на теплоходах проекта 877. Схема буксира-толкача «Шлюзовой-32» данного проекта приведена на рисунке.



Для двигателя 8ЧН14/14 с использованием пакета программы Diesel RK Net, разработанной на кафедре поршневых и комбинированных двигателей МГТУ им. Н. Э. Баумана, был выполнен многовариантный тепловой расчет [12], результаты которого приведены в табл. 5. Полученные данные свидетельствуют о том, что перевод двигателя 8ЧН14/14 на альтернативные виды топлива не приводит к существенному снижению технико-экономических показателей, а учитывая разную цену топлив, может оказаться экономически целесообразным. Экономические аспекты перевода судовых дизелей проанализированы авторами в работе [13]. Основная доля затрат при этом связана с созданием инфраструктуры, включающей заправочные базы, нормативной базы

и переподготовкой экипажей судов. С целью минимизации затрат, накопления и обобщения опыта проектирования и эксплуатации судов, работающих на газовом топливе, целесообразно начать его внедрение с судов, работающих в городских акваториях: лоцманских катеров, прогулочных и экскурсионных судов, буксиров и толкачей портового флота. В этом случае может быть эффективно использована сеть заправочных станций и инфраструктура наземного транспорта.

Дополнительный экономический эффект может быть получен в результате того, что использование газового топлива обеспечивает повышение ресурсных показателей двигателей, так как газ не смывает масляную пленку со стенок гильзы цилиндров, увеличивается срок службы масла из-за пониженного нагарообразования в камере сгорания. По имеющимся статистическим данным, собранным на автомобильном транспорте, наработки ГПД до среднего и капитального ремонта превышают соответствующие периоды для поршневых двигателей, работающих на жидких углеводородных топливах в 1,5 раза.

Таблица 5

Показатели работы двигателя 8ЧН14/14 при использовании различных видов топлива

Показатель работы двигателя	Вид используемого топлива		
	Дизельное (ГОСТ 305-82)	Природный газ (метан CH_4)	Этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
Обороты коленчатого вала, мин^{-1}	1900		
Степень сжатия	16,5		
Коэффициент избытка воздуха (оптимальный)	1,7	1,0	1,0
Угол опережения впрыска / зажигания (оптимальный), °ПКВ	20	15 – 25	10 – 20
Эффективная мощность, кВт	300	300	300
Эффективный крутящий момент, Н·м	1685	1511	1508
Среднее индикаторное давление, МПа	1,617	1,750	1,549
Среднее эффективное давление, МПа	1,406	1,586	1,480
Часовой расход топлива, кг/ч	60	66 (эквивалентно 95,8 м ³ /ч метана)	73,8
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	205	220	246
Индикаторный КПД	0,440	0,443	0,433
Эффективный КПД	0,40	0,382	0,394
Механический КПД	0,875	0,860	0,860

Для оценки экологического эффекта от перевода двигателя 8ЧН14/14 на газовое топливо в программе Diesel RK Net был рассчитан состав продуктов сгорания при использовании различных видов газового топлива и различных составов газозооушной смеси. Результаты расчетов приведены в табл. 6, где α_c — коэффициент избытка воздуха, обеспечивающий стехиометрический состав смеси; $\alpha_{пр}$ — коэффициент избытка воздуха предельно обедненной смеси, при кото-

ром обеспечивается устойчивая работа двигателя; $\alpha_{\max}$ — коэффициент избытка воздуха смеси, при котором достигается максимальное среднее индикаторное давление.

Таблица 6

Состав продуктов сгорания при использовании в двигателе 8ЧН14/14 газового топлива

Топливо	Коэффициент избытка воздуха	Мольные доли компонентов отработавших газов						
		H ₂	H ₂ O	N ₂	NO _x	CO	CO ₂	O ₂
Природный газ (метан CH ₄)	$\alpha_c = 1,0$	—	0,229	0,656	—	—	0,114	0,0009
	$\alpha_{\text{пр}} = 1,34$	—	0,180	0,685	0,003	—	0,087	0,045
	$\alpha_{\max} = 0,90$	0,016	0,228	0,633	0,007	0,02	0,102	0,0009
Этанол (C ₂ H ₅ OH)	$\alpha_c = 1,0$	—	0,308	0,692	—	—	—	0,0003
	$\alpha_{\text{пр}} = 1,25$	—	0,258	0,715	0,002	—	—	0,0272
	$\alpha_{\max} = 0,95$	0,001	0,310	0,686	—	—	—	0,0003

Данные, полученные расчетным путем, а также приведенные в работе [14] подтверждают, что перевод судовых двигателей на газовое топливо снижает отрицательное воздействие СЭУ на окружающую среду, обеспечивая выполнение как существующих, так и перспективных экологических требований Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78).

Особое внимание при использовании ГПД в составе СЭУ необходимо уделять вопросам безопасности. Особую опасность представляют аварии, связанные с утечкой газа, вызывающей пожары и взрывы. Наиболее вероятные аварии при использовании газового топлива подробно проанализированы в работе [15]. Риск возникновения указанных опасностей необходимо учитывать при выборе способа хранения и использования газового топлива на судне при проектировании его энергетической установки. Имеющийся опыт использования газомоторного топлива на водном транспорте свидетельствует о том, что наиболее перспективным из них, таким как применение сжиженного природного газа, конструкции емкостей для его хранения и места их расположения, должно уделяться особое внимание.

Результаты численных экспериментов, стендовых испытаний ГПД и опыт, накопленный при их эксплуатации, свидетельствует о том, что использование газового топлива приводит к изменению протекания рабочего цикла, перераспределению составляющих теплового баланса, изменению температур отработавших газов и охлаждающей жидкости. Как правило, переход на газовое топливо приводит к росту температуры отработавших газов и понижению температуры охлаждающей жидкости. Именно поэтому перевод двигателя на газовое топливо не должен ограничиваться модернизацией его топливной системы. Для получения максимального энерго-экологического эффекта от внедрения ГПД в СЭУ необходимо определить оптимальные для них параметры наддува и охлаждения, провести модернизацию этих систем, в том числе с использованием технических решений, приведенных в работе [16], и обеспечить автоматическое регулирование параметров охлаждения и наддува ГПД в соответствии с концепцией, изложенной в статье [17].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование ГПД в составе СЭУ целесообразно как с энергетической, так и экологической точки зрения.
2. Максимальный энергоэкологический эффект от перехода на газовое топливо возможен при комплексной модернизации систем топливоподачи, охлаждения, наддува и автоматического регулирования ГПД.
3. Определение оптимальных параметров наддува и охлаждения при переходе на газовое топливо требует дополнительных исследований.

4. Использование ГПД в составе СЭУ требует повышенного внимания к обеспечению взрыво- и пожаробезопасности.

5. Для снижения затрат, связанных с внедрением ГПД на водном транспорте, необходимо совершенствование методологии проектирования судов различного назначения (газовозы, буксиры, пассажирские) с комбинированными энергетическими установками, что позволит ускорить процесс модернизации существующих и строительства новых судов, работающих на газомоторном топливе, отвечающим всем современным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котиков Ю. Г. Транспортная энергетика / Ю. Г. Котиков, В. Н. Ложкин. — М.: ИЦ «Академия», 2006. — 272 с.
2. Международная конвенция MARPOL 73/78. Приложение VI «Предотвращение загрязнения атмосферы судами». Кн. 3. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2000. — 281 с.
3. Баранов В. А. Анализ перспективности применения различных видов альтернативного топлива на морских судах / В. А. Баранов, А. А. Сергеев, В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2010. — № 33. — С. 99–126.
4. Хачиян А. С. Сравнительная оценка выбросов двуокиси углерода различными двигателями / А. С. Хачиян // Перспективы развития энергетических установок для автотранспортного комплекса: сб. науч. тр. МАДИ (ТУ). — М., 2006. — С. 4–9.
5. Дорохов А. Ф. Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках / А. Ф. Дорохов, И. А. Апкаров, Хоан Коанг Лыонг // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 70–75.
6. Examining the Exploitation of Methanol as a Fuel Type // Diesel facts. — 2015. — № 2. — Pp. 6–7.
7. Dual-Fuel L35/44DF Engine Moves towards Market Entry // Diesel facts. — 2015. — № 2. — P. 11.
8. Власов А. А. Придет ли природный газ на смену мазуту? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.korabel.ru/news/comments/prid_t_li_prirodniy_gaz_na_smenu_mazutu.html (дата обращения: 12.10.2015).
9. Киселев Д. М. Суда на природном газе: опыт эксплуатации и перспективы развития / Д. М. Киселев, В. К. Новиков, В. В. Попов, К. И. Федин, И. В. Маслов // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 3 (62). — С. 62–64.
10. Жуков В. А. Перспективы конвертации автомобильных двигателей в судовые в аспекте экологических нормативов / В. А. Жуков, М. С. Курин // Труды 11-й Международной конференции «Актуальные проблемы современной науки». — Ч. 3. Механика и машиностроение. — Самара: Изд-во СамГТУ, 2010. — С. 41–45.
11. Жуков В. А. Модернизация системы охлаждения дизеля 8ЧН14/14 для его использования в составе судовой энергетической установки / В. А. Жуков, А. Е. Ратнов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2012. — № 2. — С. 59–64.
12. Безюков О. К. Анализ перспективности газопоршневых ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 2. — С. 45–51.
13. Безюков О. К. Экономические аспекты перевода флота на газомоторное топливо / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Актуальные проблемы экономики и управления на водном транспорте: материалы науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 31–34.
14. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Яценко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 31–39.
15. Блинков А. Н. Анализ способов применения газового топлива в судовых энергетических установках / А. Н. Блинков, А. А. Власов, В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 177–179.
16. Жуков В. А. Перспективы совершенствования систем охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 131–137.
17. Безюков О. К. Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103.

THE ANALYSIS OF POWER AND ECOLOGICAL EFFECTS OF APPLICATION OF GAS-PISTON ENGINES IN SHIP'S POWER PLANT

The article is devoted to value of power and ecological effects in the result of gas-piston engine's application in ship's power plant. Comparative characteristics of different kinds of gas fuel for internal combustion engines are given in the article. Experience of use gas-fuel for ship's engines was considered. For the engine TMZ-8481, which was converted into the ship's engine the calculation of parameters of working cycle and the composition of exhaust gas in the case of using different kinds of fuel was realized. Prospects of widening gas-piston internal combustion engines' employment into conditions of rising ecological requirements for ship power plant are shown. Problems, which must be solved for spreading gas-piston engines on water transport, are formulated. For achievement of maximal power and ecological effects is necessary complex modernization of main engine's systems: fuel system, supercharge system cooling system and automatic regulation. The ensuring of safety of ship's power plant with gas-piston internal combustion engines is very important. The cutting down of economical expenditure connected with application gas-piston engines on water transport may be provided in the case of perfect of project and exploitation of it's and maximal using of gas structure for motor land transport.

Keywords; gas-fuel, gas-piston engines, power parameters, ecological requirements, composition of exhaust gas, safety of exploitation

REFERENCES

1. Kotikov, Ju. G., and V. N. Lozhkin. *Transportnaja jenergetika*. M.: Izd-kij centr "Akademija", 2006.
2. Mezhdunarodnaja konvencija MARPOL 73/78. Prilozhenie VI «Predotvrashhenie zagryaznenija atmosfery sudami». Kn. 3. SPb.: ZAO CNIIMF, 2000.
3. Baranov, V. A., A. A. Sergeev, and V. K. Shurpjak. "Analiz perspektivnosti primeneniya razlichnyh vidov al'ternativnogo topliva na morskikh sudah." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 33 (2010): 99-126.
4. Hachijan, A. S. "Sravnitelnaja ocenka vybrosov dvuokisi ugleroda razlichnymi dvigateljami." *Perspektivy razvitiya jenergeticheskikh ustanovok dlja avtotransportnogo kompleksa: sb. nauchnyh trudov MADI (TU)*. M., 2006: 4-9.
5. Dorokhov, A. F., I. A. Apkarov, and Hoang Quang Luong. "Characteristics of the use of the gaseous fuel in marine power plants." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 70-75.
6. "Examining the Exploitation of Methanol as a Fuel Type." *Diesel facts*. 2 (2015): 6-7.
7. "Dual-Fuel L35/44DF Engine Moves towards Market Entry." *Diesel facts*. 2 (2015): 11.
8. Vlasov, A. A. Pridet li prirodnyj gaz na smenu mazutu? Web. 12.10.2015 <http://www.korabel.ru/news/comments/prid_t_li_prirodnyj_gaz_na_smenu_mazutu.html>.
9. Kiselev, D. M., V. K. Novikov, V. V. Popov, K. I. Fedin, and I. V. Maslov. "Suda na prirodnom gaze: opyt jekspluatacii i perspektivy razvitiya." *River transport (XXIst century)* 3(62) (2013): 62-64.
10. Zhukov, V. A., and M. S. Kurin. "Perspektivy konvertacii avtomobil'nyh dvigatelej v sudovye v aspekte jekologicheskikh normativov." *Trudy 11-j Mezhdunarodnoj konferencii «Aktualnye problemy sovremennoj nauki». Ch. 3 Mehanika i mashinostroenie*. Samara: Izd-vo SamGTU, 2010: 41-45.
11. Zhukov, V. A., and A. E. Ratnov. "Modernization of cooling system diesel engine made by tutaev motor plant for using in structure of shipping power mounting." *Internal Combustion Engines* 2 (2012): 59-64.
12. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and O. I. Yashenko. "Analysis of gas-piston engine's outlook." *Internal Combustion Engines* 2 (2014): 45-51.
13. Bezjukov, O. K., and V. A. Zhukov. "Jekonomicheskie aspekty perevoda flota na gazomotornoe toplivo." *Aktualnye problemy jekonomiki i upravlenija na vodnom transporte: materialy nauch.-prakt. konferencii*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2014: 31-34.
14. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, O. I. Jashhenko. "Dual-fuel engines on water transport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 31-39.
15. Blinkov, A. N., A. A. Vlasov, and V. K. Shurpjak. "Analiz sposobov primeneniya gazovogo topliva v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkah." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 177-179.

16. Zhukov, V. A. "Outlook of improving of ship diesel engine's cooling system." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 131–137.

17. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru
Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru
Воробей Константин Александрович - аспирант.
Научный руководитель:
Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru
Zhukov Vladimir Anatolevich —
Dr. of Technical science, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru
Vorobej Konstantin Aleksandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Zhukov Vladimir Anatolevich
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2015.

УДК 629.5.035-233.1-233.21-036.5.004.62:629.5.018.713

Г. А. Кушнер,
В. А. Мамонтов,
А. А. Халявкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФОРМЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ИЗ КАПРОЛОНА

Рассматриваются результаты исследований формы и коэффициента жесткости капролоновых втулок. Отмечается, что износ дейдвудных подшипников приводит к возникновению колебаний гребного вала и винта. Описано экспериментальное исследование моделей дейдвудных подшипников из капролона. Построены графики зависимости толщин втулок по их длине. Представлены формы износа модели втулки, составлены уравнения регрессии, их характеризующие. Отмечается, что механическое поведение капролона является функцией времени и температуры, при этом увеличение коэффициента жесткости подшипника приводит к увеличению частоты собственных колебаний вала. Описана методика испытаний образцов, изготовленных из бывшего в эксплуатации дейдвудного подшипника. Построен график зависимости отношения длин образцов от задаваемой нагрузки. Установлено наличие неоднородности распределения коэффициента жесткости в зависимости от степени износа.

Ключевые слова: судовой валопровод, дейдвудный подшипник, износ, коэффициент жесткости.

Введение

Дейдвудные подшипники большого числа судов изготавливаются из капролона, в процессе эксплуатации изнашиваясь неравномерно по длине подшипника. Износ вызывает неравномерную

нагруженность по длине подшипника и оказывает существенное влияние на величину контактных давлений, возникающих от воздействия гребного вала на подшипник, и, в свою очередь, на параметры поперечных колебаний валопровода. Неравномерность износа подшипника в поперечной плоскости также влияет на характер колебаний.

Износ дейдвудных подшипников, износ и повреждение облицовки гребного вала, появление усталостных трещин на валах валопровода, а также протечка дейдвудных сальников являются следствием возникновения колебаний гребного винта и гребного вала [1], [2]. Недостаточная изученность условий работы вала является одним из оснований относительно малого периода эксплуатации валопровода без ремонта [3]. Следует отметить, что дейдвудные подшипники, установленные со стороны кормы или в ступице кронштейна судна, воспринимают постоянное непрерывное биение. Они не только несут на себе вес свисающей части концевой вала с гребным винтом, но и должны поглощать колебания винта и гребного вала, возникающие при движении лопастей через постоянно меняющийся попутный поток и большие усилия, возникающие в случае воздействия переменных и случайных нагрузок на гребной винт. Все эти обстоятельства вызывают необходимость экспериментальных исследований изменения формы и коэффициента жесткости капролоновых втулок в процессе эксплуатации.

Исследование формы износа втулок

Для определения формы износа капролоновых кормовых дейдвудных подшипников во времени как самых нагруженных подшипников валопровода было проведено экспериментальное исследование на их моделях. Модели дейдвудных подшипников изготовлены из капролона (полиамид 6) согласно ТУ 605988-93.

Исследование проводилось на токарно-винторезном станке. В патрон станка установлен вал 1 диаметром $d = 30$ мм и длиной $l = 1760$ мм (рис. 1). Патрон станка 6 обеспечивает жесткое защемление вала. На другом конце вала расположен диск 2 диаметром 160 мм и толщиной $h = 40$ мм. Масса диска составляет 6,3 кг. Вал опирается на капролоновую втулку 3, установленную в металлическом корпусе 4, и фиксируется прижимным болтом 5. Исследуемая капролоновая втулка имеет следующие размеры: внешний диаметр $D = 47$ мм; внутренний диаметр $d = 30,5$ мм; длина $l = 60$ мм. Металлический корпус 4 закреплен на суппорте станка. Внутренняя поверхность втулки имеет шероховатость $Rz 40$.

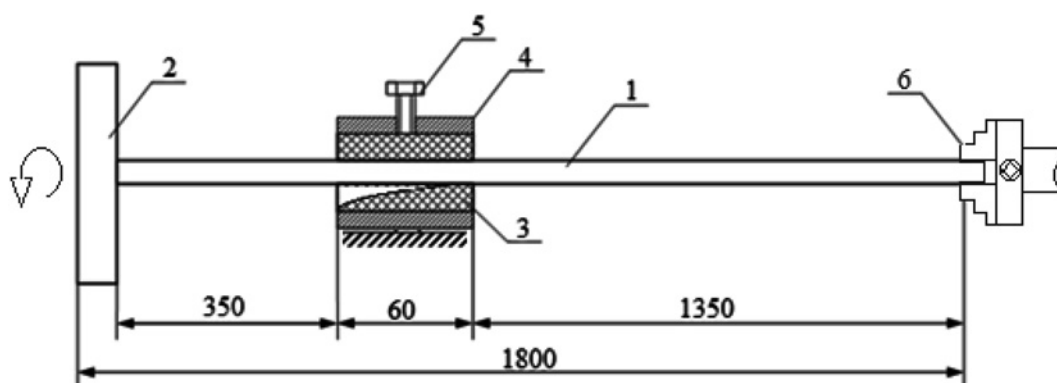


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования формы износа во времени

Для ускоренного износа втулок поверхность вращающегося вала имеет шероховатость $Rz 160$. Частота вращения валасоставляет 80 об/мин. Смазывание и охлаждение подшипника осуществляется проточной водой. Для испытаний были подобраны 15 капролоновых втулок. При испытаниях первых пяти втулок вал вращался в течение 15 ч; вторых пяти — 30 ч; оставшихся пяти втулок — 45 ч. Для измерения толщин изношенных втулок по их длине было просверлено по восемь отверстий. Толщина втулок измерялась через отверстия глубиномером штангенциркуля типа ШЦ-1.

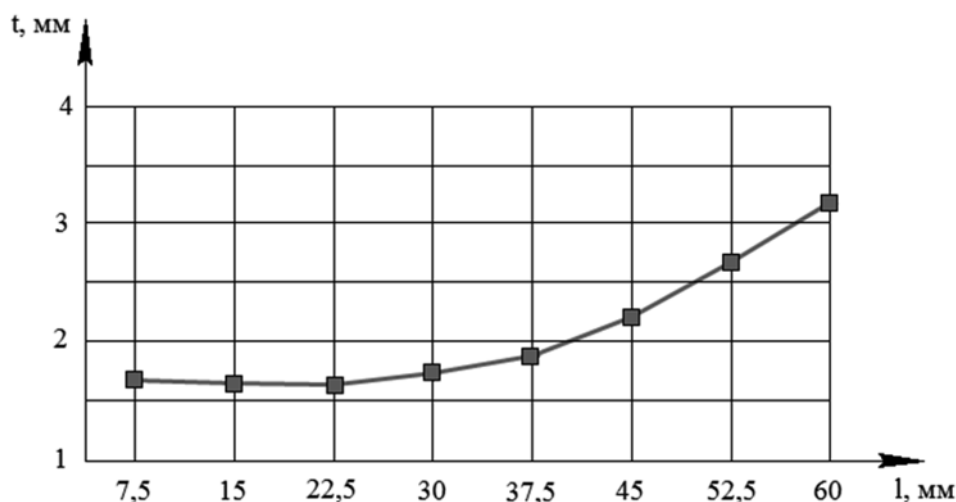


Рис. 2. Средние значения толщин стенок втулки

На основе полученных экспериментальных данных построены графики изменения толщины втулки t в зависимости от ее длины l . Форма износа имеет вид параболы (рис. 2) и не изменяется во времени.

Линии регрессии, представляющие собой полином четвертой степени:

$$y = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4, \quad (1)$$

где z — расстояние по оси абсцисс; y — износ, значения которого откладываются по оси ординат; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 — константы, значения которых определяются исходя из реального эмпирического распределения точек, определены по данным следующей таблицы.

Регрессионные уравнения кривых, характеризующих форму износа втулок

№ пп.	Время, ч	y_1 , мм	y_7 , мм	Уравнение кривой износа
1	15	8,1	6	$y = 8,1 - 3 \cdot 10^{-4} z - 3 \cdot 10^{-4} z^2 - 5 \cdot 10^{-7} z^3 - 8 \cdot 10^{-8} z^4$
2	30	8,0	5,9	$y = 8,0 - 3 \cdot 10^{-4} z - 3 \cdot 10^{-4} z^2 - 4,9 \cdot 10^{-7} z^3 - 7,9 \cdot 10^{-8} z^4$
3	45	7,5	5,4	$y = 7,5 - 3 \cdot 10^{-4} z - 2,8 \cdot 10^{-4} z^2 - 5 \cdot 10^{-7} z^3 - 8,1 \cdot 10^{-8} z^4$

Определение коэффициента жесткости капролона

Жесткость дейдвудных подшипников оказывает значительное влияние на частоту собственных колебаний вала, с увеличением жесткости значение собственной частоты растёт [4] — [6]. При кратковременном воздействии нагрузки и малых напряжениях капролон ведет себя как упругий материал с постоянным модулем упругости. При большой длительности нагружения и высоких напряжениях наблюдается ползучесть материала. При больших напряжениях хорошо заметен выход на горизонтальный участок кривой *напряжение — деформация* и, следовательно, развитие вынужденной высокоэластичной деформации. С увеличением температуры механический модуль и предел текучести уменьшаются при кратковременных воздействиях, а при большой длительности нагружения возрастает ползучесть [7].

Исследования поверхностного слоя после воздействия трения в воздушной среде показывают различия формы и структуры поверхности в зависимости от механизма износа. Углеродное волокно работает в условиях трения, зависящего от распределения давления по форме волокна [8]. При использовании углеродного армирующего волокна в процессе термического или естественного старения матрица утрачивает способность перераспределять нагрузки [9]. Следовательно, механическое поведение капролона является функцией времени и температуры. Способность ка-

пролона сорбировать влагу из окружающей среды приводит к значительному изменению механических свойств, в частности, коэффициента упругости.

Для исследования коэффициента жесткости капролона были изготовлены образцы согласно ГОСТ 4651-82. Часть образцов изготовлена из капролона дейдвудного подшипника, бывшего в эксплуатации (рис. 3). Образцы были взяты с участков, имеющих различную степень износа, и, следовательно, подвергались различным кратковременным и долговременным знакопеременным нагрузкам.

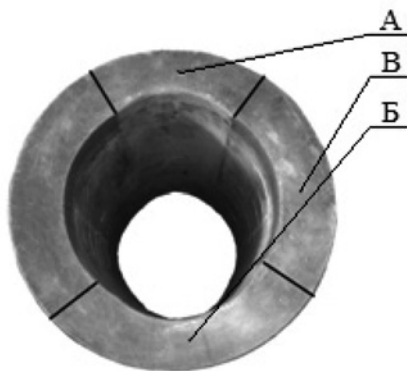


Рис. 3. Участки дейдвудного подшипника:
А — верхний; Б — нижний; В — боковой

Методика эксперимента заключалась в следующем. Образцы из капролона, которые имели форму цилиндра сплошного сечения диаметром $d = 20$ мм и длиной $l_0 = 50$ мм, сжимались при действии задаваемой нагрузки лабораторным испытательным гидравлическим прессом П-125. Величина смещения образцов при сжатии измерялась микрометром. Согласно требованиям проведения измерений при малой выборке, в эксперименте использовано небольшое количество параллельных измерений. Полученные результаты подверглись статистической обработке при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. По средним значениям результатов исследования построен график зависимости отношения длин образцов $y_{A,B}$ и y_B , вырезанных из участков А, Б и В, соответственно, от задаваемой нагрузки P (рис. 4). Отношение $y_{A,B}/y_B$ наглядно демонстрирует различие величин в зависимости от изменяемого параметра — нагрузки.

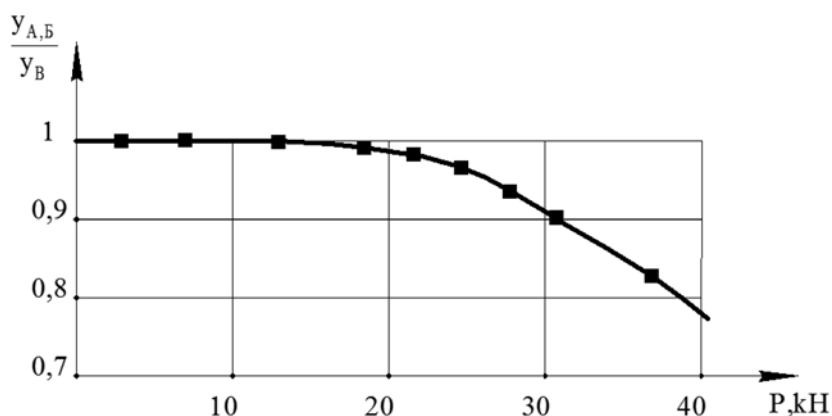


Рис. 4. Зависимость отношения длин образцов от задаваемой нагрузки

Среднее значение коэффициента жесткости образцов определялось в зоне пропорциональности, поскольку при нагрузке более 15 кН наблюдается нелинейный закон деформации образцов, о чем свидетельствует не только быстрое изменение длины образцов, но и интенсивное изменение их формы. Модуль упругости капролона в зоне действия закона пропорциональности определен

согласно ГОСТ 9550-81, коэффициент жесткости — по методу А. Б. Клейнера [10]. Среднее значение модуля упругости составляет:

– для образцов, вырезанных из участков *А* и *Б*, $E_{cp} = 2,79 \cdot 10^9$ Па, коэффициент жесткости $k_{cp} = 1,12 \cdot 10^9$ Па;

– для образцов участка *В* $E_{cp} = 3,9 \cdot 10^9$ Па, коэффициент жесткости $k_{cp} = 1,59 \cdot 10^9$ Па.

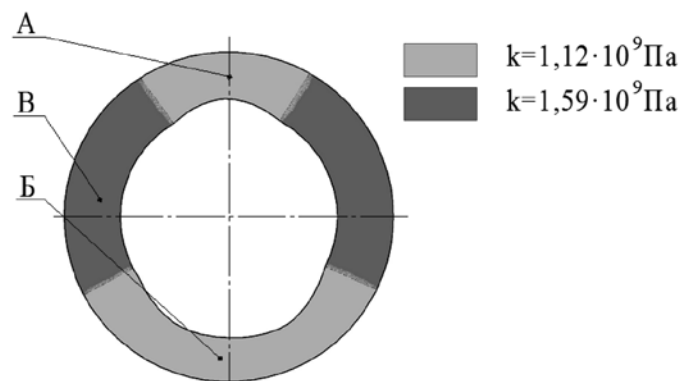


Рис. 5. Распределение коэффициента жесткости по периметру капролоновых втулок

Неоднородность коэффициента жесткости по периметру втулки приведена на рис. 5. Снижение коэффициента жесткости изношенных участков *А* и *Б* по отношению к участку *В* составило примерно 40 %.

Выводы

1. Установлено, что износ по длине капролоновых дейдвудных подшипников судов является неравномерным и представляет собой форму параболы четвертого порядка.
2. На изношенном капролоновом дейдвудном подшипнике существует неоднородность распределения коэффициента жесткости и модуля упругости в зависимости от степени износа отдельного участка. Снижение жесткости изношенных участков обусловлено различными факторами, в частности, увеличенной нагрузкой гребного вала.
3. Полученные данные могут быть полезны при расчете поперечных колебаний валопроводов судов, а также при прогнозировании их надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румб В. К. Прогнозирование долговечности дейдвудных подшипников / В. К. Румб // Морской вестник. — 2008. — № 2. — С. 30–31.
2. Мамонтов В. А. Анализ износов капролоновых втулок дейдвудных подшипников гребного вала / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, Ч. А. Кужахметов, А. А. Халявкин // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 30–35.
3. Миронов А. И. Поперечные колебания гребного вала при его одностороннем взаимодействии с дейдвудным подшипником / А. И. Миронов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 26–34.
4. Мамонтов В. А. Расчет поперечных колебаний валопроводов судов с учетом длины и жесткости дейдвудных подшипников / В. А. Мамонтов, А. Р. Рубан, Н. В. Куличкин, А. А. Халявкин // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 30–33.
5. Халявкин А. А. Влияние коэффициента жесткости капролона на частоту собственных колебаний валопроводов судов / А. А. Халявкин, В. А. Мамонтов, М. П. Комаров // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 45–50.
6. Халявкин А. А. Оценка влияния износа кормового дейдвудного подшипника на собственную частоту при поперечных колебаниях валопровода судна / А. А. Халявкин, М. П. Комаров, В. А. Мамонтов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 3. — С. 13–20.

7. Нелсон У. Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / У. Е. Нелсон. — М.: Химия, 1979. — 254 с.
8. Wilczewska I. Механизм изнашивания используемых в судостроении полимеров, укрепленных однонаправленными углеродистыми волокнами / I. Wilczewska, R. Kaczyński, S. G. Chulkin // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 71–79.
9. Белецкий Е. Н. Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условиях эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
10. Клейнер А. Б. Взаимосвязь износа вкладышей дейдвудных подшипников с несущей способностью гребного вала: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Клейнер. — Одесса, 1972. — 22 с.

RESEARCH INTO THE CHANGE OF THE FORM AND STIFFNESS COEFFICIENT OF POLYAMIDE SLEEVE MODELS

The article is devoted to the results of the research into wear and stiffness of polyamide bushes. It is noted that wear of the stern-tube bearings leads to vibrations of the propeller and propeller shaft. Experimental study was carried out on the models of the stern-tube bearings made of polyamide. The thickness of the bush wall was plotted as a function of the bush length. The forms of bush wear are presented, and regression equations are made up to describe them. It is noted that increasing stiffness of the bearing leads to an increase in the natural frequency of the shaft. It is alleged that the mechanical behavior of polyamide is a function of time and temperature. The technique to test the samples made from previously used stern-tube bearing is described. A plot of the samples lengths relationship versus a given load is constructed. The presence of inhomogeneity in stiffness distribution depending on the degree of wear is established.

Keywords: shafting, stern-tube bearing, wear, stiffness coefficient.

REFERENCES

1. Roumb, V.K. "Forecasting of stern tube bearings' durability." *Morskoy Vestnik* 2 (2008): 30-31.
2. Mamontov, Victor Andreevich, Alfred Ivanovich Mironov, Chingiz Asanovich Kuzhakhmetov, and Alexey Aleksandrovich Khalyavkin. "Wear analysis of polycaprolactam bushings of deadwood bearings of the propeller shaft." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 30-35.
3. Mironov, Alfred Ivanovich. "Transverse vibrations of the propeller shaft in its one-way interaction with stern bearing." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 26-34.
4. Mamontov, Victor Andreevich, Anatoliy Rashidovich Ruban, Nickolay Vladimirovich Kulichkin, and Aleksey Aleksandrovich Khalyavkin. "Calculation of transverse vibrations of ship shafts taking into account the length and rigidity of stern-tube bearings." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2010): 30-33.
5. Khalyavkin, Aleksey Aleksandrovich, Victor Andreevich Mamontov, and Mikhail Petrovich Komarov. "Effect of caprolon stiffness on the natural frequency of marine shaft lines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 45-50.
6. Khalyavkin, Aleksey Aleksandrovich, Mikhail Petrovich Komarov, and Victor Andreevich Mamontov. "Assessment of influence of wear and tear of the stern shaft bearing on its own frequency while cross fluctuations of shaft lines of the vessel." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2014): 13-20.
7. Nelson, U. E. *Tehnologija plastmass na osnove poliamidov*. M.: Izd-vo "Himija", 1979.
8. Wilczewska, I., R. Kaczyński, and S. G. Chulkin. "The mechanism of wear process of the polymers used in shipbuilding strengthened by unidirectional carbonaceous fibres." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 71-79.

9. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpalchuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 66-73.

11. Klejner, A. B. *Vzaimosvjaz iznosa vkladyshej dejdvudnyh podshipnikov s nesushhej sposobnostju grebnogo vala*: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation. Odessa, 1972.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кушнер Гурий Алексеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
dinalt_13@mail.ru
Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
a.ruban1974@mail.ru
Халявкин Алексей Александрович —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
sopromat112@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kushner GuriyAlexeevich — postgraduate.
Supervisor:
Mamontov Viktor Andreyevich
FSBEI HPE "ASTU"
dinalt_13@mail.ru
Mamontov Viktor Andreyevich —
Dr. of Technical science, professor.
FSBEI HPE "ASTU"
a.ruban1974@mail.ru
Haljavkin Alexei Alexandrovich —
PhD.
FSBEI HPE "ASTU"
sopromat112@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 октября 2015.

УДК 623.827

**Е. А. Чернышов,
Е. А. Романова,
А. Д. Романов**

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО БЕЗГАЗОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Выполнено исследование вопроса о ведении интенсивных поисков источников энергии, альтернативных атомным, в том числе для оснащения ими морских и подземных объектов — подводных лодок, подводных аппаратов, подземных электростанций и др. В этом плане значительный интерес представляют анаэробные или воздухонезависимые энергетические установки, т. е. установки, работающие без использования атмосферного воздуха, применение которых позволяет значительно улучшить тактико-технические характеристики неатомных подводных лодок, в частности значительно увеличить дальность непрерывного подводного плавания. Представлены результаты практических испытаний тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива для воздухонезависимой энергетической установки неатомных подводных лодок и других подводных объектов. Приведены фотоснимки, микроструктура образцов и результаты рентгенофазного анализа, подтверждающие теоретические предположения относительно горения массива высокометаллизированного топлива.

Ключевые слова: неатомная подводная лодка, воздухонезависимая энергетическая установка, тепловыделяющий элемент, горение, алюминий, оксид алюминия

В

НАСТОЯЩЕЕ время как для наземных так и для подводных объектов разрабатываются и внедряются воздухонезависимые энергетические установки [1] – [4]. В большинстве случаев для данных энергоустановок в качестве топлива используется углеводородное

топливо либо водород, однако также разработаны установки на основе высокометаллизированного топлива [2], [5], [6]. При этом практическое внедрение получили только малые энергоустановки, в частности подводные ракеты на гидрореагирующем топливе ВА-111 и торпеды Mk.50 Advanced Lightweight Torpedo. При этом, по данным [7], энергоемкость системы «двигатель Стирлинга — аккумулятор тепла» с теплоаккумулирующим веществом Al_2O_3 в 8 раз превосходит классическую систему «свинцово-кислотная батарея — электродвигатель». Практически все разработанные установки на основе высокометаллизированного топлива используют топливо в гранулированном состоянии.

Наибольшее количество тепла при окислении кислородом выделяют следующие металлы: литий, бериллий, магний, кальций, алюминий, титан и цирконий, а также неметаллы: водород, бор, углерод, кремний и фосфор [8], [9]. С практической точки зрения в качестве горючего лучшим вариантом является алюминий, поскольку он имеет сравнительно небольшую стоимость, безопасен в обращении в монолитном состоянии при комнатной температуре, его запасы на борту, по сравнению с углеводородными горючими, являются более компактными. При этом удельная теплота сгорания алюминия на один килограмм продуктов сгорания в 1,2 – 1,6 раза выше, чем у углеводородного горючего, за счет меньшего расхода окислителя на 1 кг горючего.

В работе предложен вариант сжигания высокометаллизированного топлива из монолитного состояния, что снижает стоимость топлива, упрощает хранение и перезарядку, повышает удельную плотность. В разрабатываемой установке основным горючим является алюминий, основным окислителем — кислород, при этом вторичный окислитель (оксиды химически менее активных металлов) позволяет уменьшить необходимый объем кислорода на борту (таблица).

Характеристики применяемого топлива и окислителей

Характеристики топлива и окислителя	Топливо /Окислитель		
	алюминий / кислород	алюминий / оксид железа	углеводородное топливо* / кислород
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г топлива	31,04	15,81	42,7
Расход окислителя на 1 г топлива	0,89	2,96	3,33
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г продуктов сгорания	16,43	3,99	9,86
Удельный вес систем хранения, испарения и подачи окислителя, г/г окислителя	0,1 – 1	0 (окислитель механически смешан с топливом)	0,1 – 1
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г продуктов сгорания с учетом систем хранения окислителя	11,17 – 15,68	3,99	5,57 – 9,16

* Приведено для примера.

Необходимо отметить, что продукты сгорания углеводородного горючего в нормальных условиях представляют собой газы и сконденсированную воду, которые нуждаются в утилизации. При этом системы утилизации продуктов сгорания (вымораживание, химическое поглощение

и др.) занимают дополнительный объем либо требуют дополнительных затрат энергии для удаления продуктов сгорания за борт.

Изменение соотношений высокометаллизированное топливо / окислитель (кислород) / вторичный окислитель (оксиды металлов), в зависимости от применяемого преобразователя энергии, двигатель с внешним подводом тепла (Стирлинга) либо паровая турбина (включая установки с низкикипящим теплоносителем) позволяет оптимизировать массогабаритные параметры установки с нулевым показателем тепловых выбросов в окружающую среду при условии использования энергии холода жидкого кислорода. Несмотря на то, что создание энергетических установок только с применением термитных смесей практически реализовано, данные смеси представляют опасность как при хранении, так и при применении, поэтому оптимальным вариантом будет являться комбинированное использование окислителей: кислорода и оксидов железа, хрома и др. При этом изменяя скорость подачи окислителя (кислорода), возможно регулирование тепловыделения, и реакция горения может быть остановлена при прекращении подачи кислорода, что невозможно сделать в энергетических установках, работа которых основана на горении термитных смесей.

В то же время использование в надводном положении высокометаллизированного топлива не является оптимальным, поэтому в проекте предусматривается применение двухконтурной системы (рис. 1), которая позволит использовать в надводном положении жидкое углеводородное горючее и воздух в качестве окислителя. На схеме пунктирной линией показан комплекс воздухо-независимых энергетических установок на основе высокометаллизированного топлива, штрихпунктирной — возможный вариант работы с использованием углеводородного топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя.

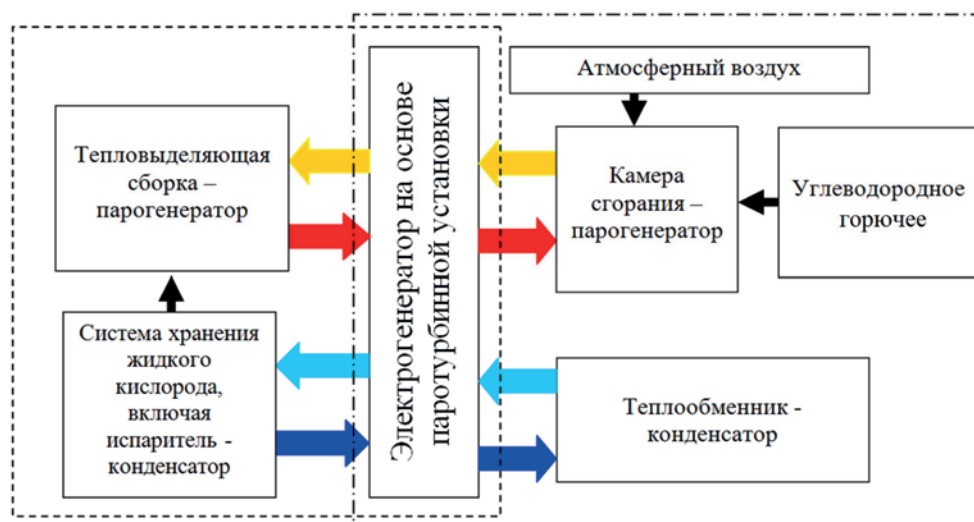


Рис. 1. Принципиальная схема энергетической установки

На рис. 2 приведен пример схемы парогенератора, в котором указано возможное расположение тепловыделяющего элемента, парогенератора, корпуса — теплового аккумулятора, теплоизоляции и внешнего газонепроницаемого корпуса. На рис. 3 представлен пример схемы тепловыделяющего элемента, в котором указано возможное расположение горючего, запального устройства, канала вторичного окислителя, канал подачи кислорода.

Температура поверхности разрабатываемого тепловыделяющего элемента при расчетных параметрах работы не должна превышать температуру плавления алюминия либо в случае применения защитной гильзы — температуру плавления материала, из которого она изготовлена. При проектной аварийной ситуации (разрыв трубопровода, подающего теплоноситель в парогенератор, и отключение подачи кислорода в тепловыделяющий элемент) температура поверхности пароген-

нератора не должна превышать температуру плавления материала парогенератора. Запроектной аварийной ситуацией считается полное расплавление корпуса теплового аккумулятора и парогенератора, при этом расплав удерживается теплоизоляцией и внешним металлическим контуром. Необходимо отметить, что количество вторичного окислителя в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) должно исключать возможность воспламенения и самораспространяющегося горения.

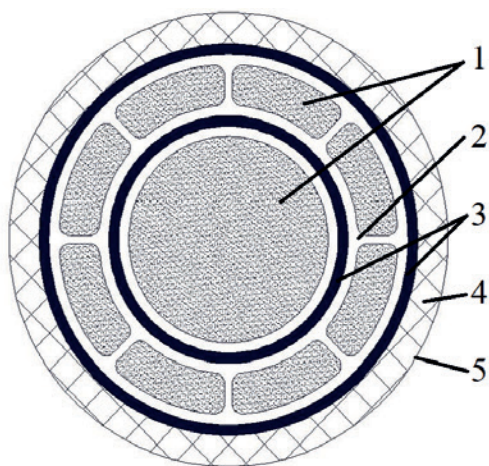


Рис. 2. Пример схемы парогенератора:
1 — тепловыделяющий элемент (высокометаллизируемое топливо);
2 — корпус-теплоаккумулятор;
3 — парогенератор;
4 — теплоизоляция;
5 — внешний газонепроницаемый корпус (размеры приведены произвольно)

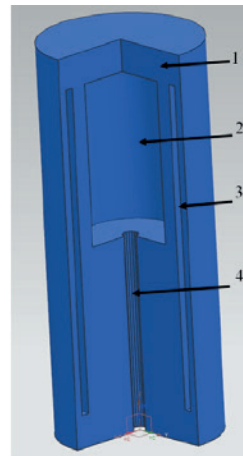


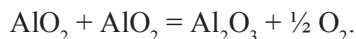
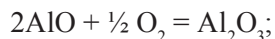
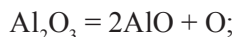
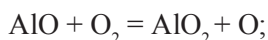
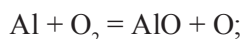
Рис. 3. Пример схемы тепловыделяющего элемента:
1 — заряд горючего (Al сплав);
2 — пространство для размещения запального устройства, обеспечивающего прогрев и расплавление первоначальной реакционной зоны;
3 — канал вторичного окислителя;
4 — канал подачи окислителя (кислород) (размеры каналов и камеры запального устройства приведены произвольно)

С точки зрения практической применимости одной из основных задач является прогрев исходных компонентов до заданных температур и обеспечение полноты прохождения реакции, расчет зоны горения и тепловыделения.

В условиях экспериментального стенда, фактически, можно рассматривать следующие основные протекающие реакции:



Кроме того, согласно [10], возможно протекание промежуточных реакций окисления алюминия:



При этом реакция (1) происходит в заряде, предназначенном для предварительного разогрева, и выделившаяся теплота в первоначальный момент времени расходуется на нагрев, расплавление и перегрев топлива. В дальнейшем она происходит в зоне канала вторичного окислителя, обеспечивая более полное сгорание вблизи стенок твэла. Реакция (2) является основной, и ее теплота расходуется на нагрев, расплавление и перегрев топлива в ходе всего цикла горения. Как показано далее, реакция (3) протекает при уменьшении скорости подачи окислителя, при этом расплавы алюминия и железа образуют интерметаллид.

Экспериментальная часть

Для практического подтверждения был изготовлен экспериментальный стенд, на котором проведены исследования горения расплава топлива, включая зажигание, расплавление и горение массива топлива, снижение расхода окислителя, а также временное и полное прекращение подачи окислителя. В ходе испытаний было показано, что при прекращении подачи окислителя через некоторое время тепловыделение только за счет взаимодействия горючего с вторичным окислителем прекращается. На рис. 4 приведены фотографии закристаллизовавшегося фронта горения в каналах, заполненных мелкодисперсными (менее 5 мкм) — рис. 4, *а* либо крупнодисперсными частицами оксидов (рис. 4, *б*).

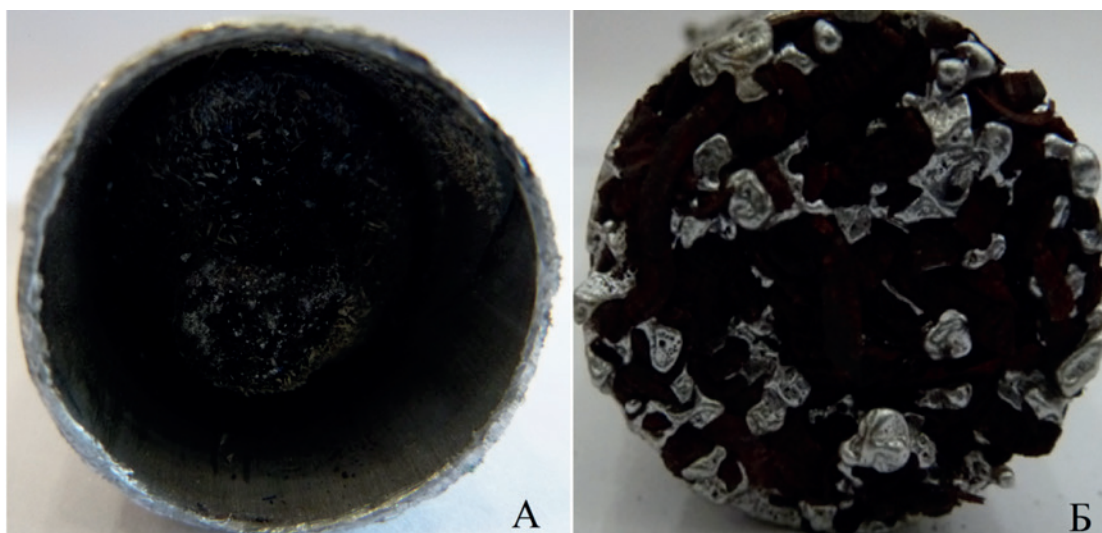


Рис. 4. Кристаллизация фронта горения расплава в канале вторичного окислителя:
а — канал, заполненный мелкодисперсными частицами вторичного окислителя после прекращения горения;
б — канал, заполненный крупнодисперсными частицами вторичного окислителя после прекращения горения

На основе полученных результатов экспериментов без применения вторичного окислителя по определению границ зоны «горение — расплавление» со сливом расплава горючего и продуктов сгорания и их захлаживания инертным газом было установлено, что зона горения имеет форму, близкую к шарообразной с диаметром, близким к диаметру элемента. Диаметр основания конуса и его высота зависят в основном от скорости подачи газа.

Скорость горения металла и движения зоны горения вниз определяется двумя основными факторами: скоростью подачи окислителя и скоростью обгорания фурменной зоны. На рис. 5 приведены фотографии элементов твэла, вырезанных после 5 мин горения. Захлаживание зоны горения производилось инертным газом, слив расплава топлива и продуктов горения выполнялся через боковое окно. На рис. 5, *а* приведена схема горения твэл, на рис. 5, *б* показана верхняя часть конусной части зоны горения (конус закрыт тонкой металлической пленкой), на рис. 5, *в* — конусная часть, на рис. 5, *г* — сопловая часть (плоскость реза развернута параллельно оси сопла), выполненная из стали 316L, причем на фото видно, что горения металла сопла не происходило. Внешний диаметр трубки составляет 6 мм, толщина стенки — 1 мм. Установлено, что горение

массива топлива имеет значительные отличия от горения одиночных частиц, описание математической модели которых приведено в литературе [10] – [14]. Перегрев расплава в ходе горения предположительно приводит к вскипанию алюминия и прорыву его через слой оксида алюминия в конусной части выше сопла, т. е. горение металла переходит в газовую фазу. Данный эффект был ранее подтвержден экспериментально и описан в литературе [14]. Из рис. 5 следует, что распространение фронта горения массива значительно отличается от горения термитной смеси. При этом существенным ограничением является наличие следующих условий.

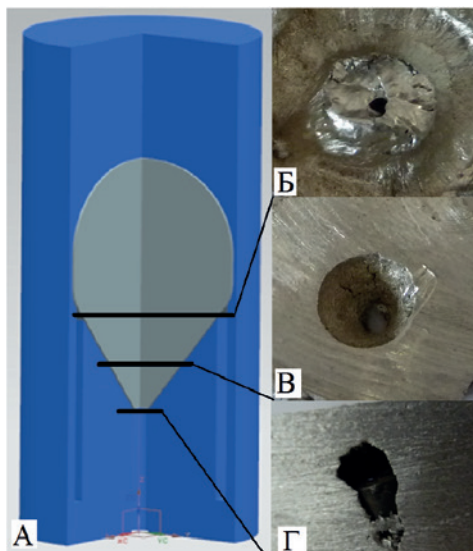


Рис. 5. Пример испытаний по горению высокометаллизированного элемента:
а — схема горения твэл; б — верхняя часть конусной зоны горения;
в — конусная часть; г — сопловая часть

Обеспечение прогрева массива металла для устойчивого горения. При этом условно считается, что количество передаваемой энергии пропорционально площади поперечного сечения твэла (в частности, квадрату радиуса). Необеспечение выполнения данного условия приводит к неполному сгоранию топлива либо прекращению реакции.

Обеспечение теплосъема теплоносителям. При этом величина теплосъема, пропорциональная площади нагретой части твэла, пропорциональной радиусу твэла в первой степени, должна находиться в определенных пределах. Необеспечение данного условия приводит к прогарам и / или искажению геометрии твэла либо неполному сгоранию топлива, что также может сопровождаться искажением геометрии и / или прорывом кислорода в теплоноситель. На рис. 6 приведен образец ТВЭЛ при интенсивном охлаждении стенок. Отделение верхней части было выполнено отрезной машиной, в нижней части был выполнен кольцевой надрез, с последующим доломом образца. Следует отметить, что по периметру ТВЭЛ представляет собой монолитную структуру, разрушение которой наступает при подготовке образца.



Рис. 6. Пластинчатая структура в центре твэл при интенсивном охлаждении поверхности

При работе данной системы накладывается существенное ограничение на подачу окислителя — в случае длительного прекращения подачи окислителя расплав топлива и продуктов горения проникает в канал окислителя и через некоторое время кристаллизуется, что делает невозможным продолжение работы. Поэтому необходимо постоянно поддерживать давление подачи окислителя, не меньшее, чем гидростатическое давление расплава топлива и продуктов горения. При этом расход окислителя может быть незначительным и определяться тепловыми потерями в системе. Однако при снижении расхода окислителя (кислорода) происходит уменьшение конусной части зоны горения, при этом температура сопловой части возрастает и происходит её интенсивное обгорание, при этом зона горения перемещается вниз быстрее, чем в случае развитого струйного течения, при этом происходит неполное сгорание топлива. В частности, на рис. 4, з приведен сопловый блок после более чем пятиминутной работы, при этом обгорания практически не происходит. На рис. 7 приведен частично сгоревший сопловый блок. В верхней части рисунка показан сопловый блок из стали 316L, в средней части приведена аналогичная трубка в исходном состоянии, в нижней части — аналогичный блок из стали 12X18H10T.

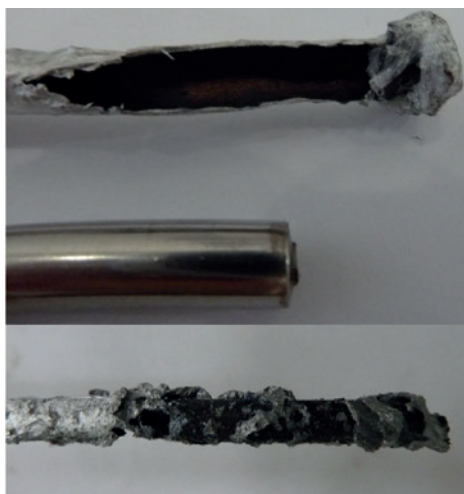


Рис. 7. Сопловый блок

При одинаковом времени горения продолжительностью 5 мин наблюдается различный характер разрушения сопла. На рис. 8 приведена микроструктура образца, вырезанного из тепловыделяющего элемента из зоны горения в штатном режиме. При этом обгорание соплового блока отсутствовало или было минимальным, суммарное время проведения эксперимента составило примерно 15 мин. Согласно рентгенофазовому анализу, неметаллическими включениями являются частицы оксида алюминия.

На рис. 9 приведена микроструктура элемента после работы с минимальной мощностью и, соответственно, высокой степенью обгорания соплового блока. Согласно рентгенофазовому анализу, включениями являются частицы оксида интерметаллида (Fe-Al), причем, по данным анализа, оксид алюминия отсутствует.

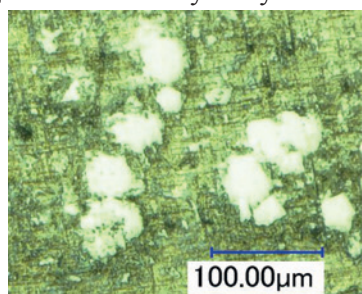


Рис. 8. Микроструктура частично выгоревшего элемента

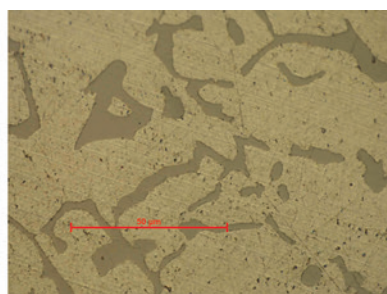


Рис. 9. Микроструктура образца в зоне образования интерметаллидных соединений

Обзор литературы по данному вопросу показал, что в ряде случаев может наблюдаться отсутствие дифракционных отражений оксида алюминия [16]. Это можно объяснить образованием рентгеноаморфной разновидности либо частицы высокодисперсного оксида алюминия «окутаны», т. е. пространственно разделены и «замаскированы» пластичными металлами. Факт отсутствия дифракционных отражений оксида алюминия является косвенным свидетельством его нанодисперсности и гомогенности распределения в образце.

Вывод

Проведенные опытные пуски подтвердили практическую возможность горения массива топлива, изменения мощности и удержания процесса горения при минимальном расходе окислителя. При этом реакция горения при прекращении подачи кислорода прекращается, что делает установку более безопасной в применении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.
2. Дядик А. Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А. Н. Дядик, В. В. Замуков, В. А. Дядик. — СПб.: Судостроение, 2006. — 414 с.
3. Чернышов Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышов, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 140–152.
4. Романова Е. А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок / Е. А. Романова, А. Д. Романов, Е. А. Чернышов // Вооружение и экономика. — 2015. — № 1 (30). — С. 99–105.
5. Дмитриев А. Л. Автономные комбинированные энергоустановки с топливными элементами, работающие на продуктах гидротермального окисления алюминия / А. Л. Дмитриев, В. К. Иконников, А. И. Кириллов, В. Ю. Рыжкин, Е. А. Ходак // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». — 2008. — № 11. — С. 10–16.
6. Грейнер Л. Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1978. — 384 с.
7. Кормилицин Ю. Н. Устройство подводных лодок: в 2 т. — Т. 2. / Ю. Н. Кормилицин, О. А. Хализев. — СПб.: Элмор, 2009. — 280 с.
8. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / Д. А. Ягодников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 424 с.
9. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский. — М.: Машиностроение, 1973. — 280 с.
10. Бектед М. В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) / М. В. Бектед, У. Лианг, К. В. Паддупаккам // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41. — № 6. — С. 15–33.
11. Федоров А. В. Воспламенение частицы алюминия / А. В. Федоров, Ю. В. Харламова // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39. — № 5. — С. 65–68.
12. Бабук В. А. Горение металлического горючего в поверхностном слое твердого ракетного топлива / В. А. Бабук // Второй межд. семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». — СПб., 1997. — С. 194–219.
13. Бектед М. В. Анализ данных по временам горения частиц алюминия / М. В. Бектед // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41. — № 5. — С. 55–69.
14. Григорьева Т. Наноккомпозиты металл/оксид и интерметаллид/оксид / Т. Григорьева, Т. Киселева, А. Новакова, И. Ворсина, А. Баринова, V. Sepelak, K. Becker, Н. Ляхов // Труды X Международной конференции «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». — Ростов н/Д. — Лоо, 2007. — С. 43–46.

DEVELOPMENT OF THE HEATALLOCATING ELEMENT ON THE BASIS OF THE HIGH-METALLIZED GAS-FREE FUEL FOR THE AIR INDEPENDENT POWER STATION

Research of a question of conducting intensive searches of the power sources alternative nuclear, including for equipment of sea and underground objects by them — submarines, submersibles, underground power plants, etc. is executed. In this plan considerable interest is presented by anaerobic or air-independent power stations, i.e. the installations working without use of atmospheric air which application allows improving considerably tactical

technical characteristics of not nuclear submarines in particular considerably to increase range of continuous scuba diving. Results of practical tests of the warm allocating element on the basis of the high-metallized gas-free fuel for air-independent power station of not nuclear submarines and other underwater objects are presented. The pictures, microstructure of samples and results of the X-ray phase analysis confirming theoretical assumptions concerning burning of the massif of the high-metallized fuel are given.

Keywords: not nuclear submarine, the air-independent power station, burning, aluminum, aluminum oxide.

REFERENCES

1. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Sudostroenie* 4 (2012): 29–33.
2. Dyadik, A. N., V. V. Zamukov, and V. A. Dyadik. *Korabelnye vozdukhonезavisimye energeticheskie ustanovki*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
3. Chernyshov, E. A., E. A. Romanova, and A. D. "Romanov. Development of airindependent power stations of submarines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152.
4. Romanova, E. A., A. D. Romanov, and E. A. Chernyshov. "Assessment of relevance of development of airindependent power installations and export potential of not nuclear submarines." *Armament and economics* 1(30) (2015): 99–105.
5. Dmitriev, A. L., V. K. Ikonnikov, A. I. Kirillov, V. Ju. Ryzhkin, and E. A. Khodak. "Autonomous combined power plants with fuel cell which works on products of hydrothermal aluminium oxidation." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2008) :10–16.
6. Greiner, Leonard. *Gidrodinamika i jenergetika podvodnyh apparatov*. L.: Sudostroenie, 1978.
7. Kormilitsin, Yu. N., and O. A. Halizev. *Ustrojstvo podvodnyh lodok. Tom 2*. SPb.: «Jelmor», 2009.
8. Jagodnikov, D. A. *Vosplamnenie i gorenje poroshkoobraznyh metallov*. M.: Izdatelstvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2009.
9. Shidlovskij, A. A. *Osnovy pirotehniki*. M.: Mashinostroenie, 1973.
10. Beksted, M. V., U. Liang, and K. V. Padduppakkam. "Matematicheskoe modelirovanie gorenija odinochnoj aljuminievoj chasticy (obzor)." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 41.6 (2005): 15–33.
11. Fedorov, A. V., and Yu. V. Kharlamova. "Ignition of an Aluminum Particle." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 39.5 (2003): 544–547.
12. Babuk, V. A. "Gorenje metallichesкого gorjuchego v poverhnostnom sloe tverdogo raketnogo topliva." *Vtoroj mezhdunarodnyj seminar «Vnutrekamernye processy, gorenje i gazovaja dinamika dispersnyh sistem»*. SPb., 1997: 194–219.
13. Bekted, M. V. "Analiz dannyh po vremenam gorenija chastic aljuminija." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 41.5 (2005): 55–69.
14. Grigoreva, T., T. Kiseleva, A. Novakova, I. Vorsina, A. Barinova, V. Sepelak, K. Becker, and N. Ljahov. "Nanokompozity metall/oksid i intermetallid/oksid." *Trudy X Mezhdunarodnoj konferencii "Porjadok, besporjadok i svojstva oksidov"*. Rostov-na-Donu–Loo, 2007: 43–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Евгений Александрович —
доктор технических наук, профессор.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романова Елена Анатольевна — аспирант.
Научный руководитель:
Чернышов Евгений Александрович.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романов Алексей Дмитриевич — инженер.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernyshov Evgeny Aleksandrovich —
Dr. of Technical science, professor.
Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanova Elena Anatolievna — postgraduate.
Supervisor:
Chernyshov Evgeny Aleksandrovich.
Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanov Aleksey Dmitrievich — engineer.
Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 656.62/629.783/621.396.932

**В. В. Каретников,
И. В. Пашенко,
А. И. Соколов**

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПОЛЕМ ГНСС ГЛОНАСС НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ

В настоящее время на Северном морском пути (СМП) наблюдается ежегодный рост объемов перевозок, осуществляемых морским флотом, поэтому существует острая необходимость построения системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС. Построение такой системы позволит качественным образом осуществлять контроль дифференциального поля, что позволит повысить уровень безопасности мореплавания. На СМП внедрено и функционирует шесть контрольно-корректирующих станций (ККС), которые формируют дифференциальное поле независимо друг от друга, причём комплексный контроль параметров дифференциального поля практически не ведётся. Не существует технологий, позволяющих осуществлять качественный контроль и управление дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС. В данной статье представлены предложения, которые позволяют сформировать на СМП систему управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС.

Ключевые слова: система мониторинга, СМП, контрольно-корректирующая станция, дифференциальное поле, безопасность мореплавания.

СЕВЕРНЫЙ морской путь (СМП) — кратчайший морской путь между Европейской частью России и Дальним Востоком, который определяется законодательством РФ как исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация России в Арктике. СМП проходит по морям Северного Ледовитого океана (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и частично Тихого океана (Берингово море). Длина СМП от Карских Ворот до бухты Провидения составляет около 5600 км. СМП организационно делится на:

- западный сектор Арктики от Мурманска до Дудинки, который обслуживается ледоколами Мурманского морского пароходства;
- восточный сектор Арктики от Дудинки до Чукотки, обслуживается ледоколами Дальневосточного морского пароходства.

РФ сегодня продолжает освоение и использование СМП. В ближайшем будущем прогнозируется увеличение общего объема грузопотока по трассе «СМП». В соответствии с уже начатыми проектами по освоению газовых месторождений полуострова Ямал и другими проектами по развитию Сибири и Дальнего Востока арктическая морская транспортная система должна обеспечить к 2020 г. объем перевозок по СМП до 64 млн т. Поэтому работы по оснащению СМП ККС ГНСС ГЛОНАСС, несмотря на имеющиеся трудности, связанные с отсутствием необходимой инфраструктуры и дополнительными транспортными затратами, являются на сегодняшний день наиболее актуальными.

На данный момент на СМП установлены и эксплуатируются шесть ККС: на о. Олений, на мысе Стерлигова, на о. Андрея, на о. Столбовой, на р. Индигирка, на о. Каменка. Все эксплуатируемые ККС работают независимо друг от друга, ими не сформировано сплошное дифференциальное поле, также отсутствует централизованный контроль за работой существующих ККС. Актуальная на данный момент картина расположения ККС на СМП показана на рис. 1.

В соответствии с Государственной программой РФ «Развитие транспортной системы», подпрограммой «Морской и речной транспорт», подпрограммой «Развитие гражданского использова-

ния системы ГЛОНАСС на транспорте», Постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 319 для организации высокоточного дифференциального сервиса в районе СМП и устьевых районов северных рек предполагается использование дополнительно к существующим ещё восьми ККС, работающих в СВ-диапазоне. Эти ККС предполагается разместить в следующих опорных пунктах: мыс Тонкий (Югорский Шар), о. Визе (Карское море), пос. Новорыбное (устье р. Хатанга), о. Котельный (море Лаптевых), ККС Янрангай (Восточно-Сибирское море, пос. Певек), о. Врангеля (Чукотское море), мыс Дежнева (Чукотское море), пос. Провидения (Чукотка) (рис. 2).

Установка дополнительной ККС, по всей видимости, позволит обеспечить надлежащий уровень сопряжения и перекрытие зон действия соседних ККС. Таким образом, весь СМП будет охвачен сетью ККС, которые будут способствовать повышению точности и достоверности определения координат судов, что в свою очередь, будет способствовать повышению уровня безопасности мореплавания [1]. Все ККС предлагается оборудовать средствами коммуникации, которые позволят осуществлять обмен электронной корреспонденцией, и коротковолновыми приёмопередатчиками, объединёнными в единую сеть.

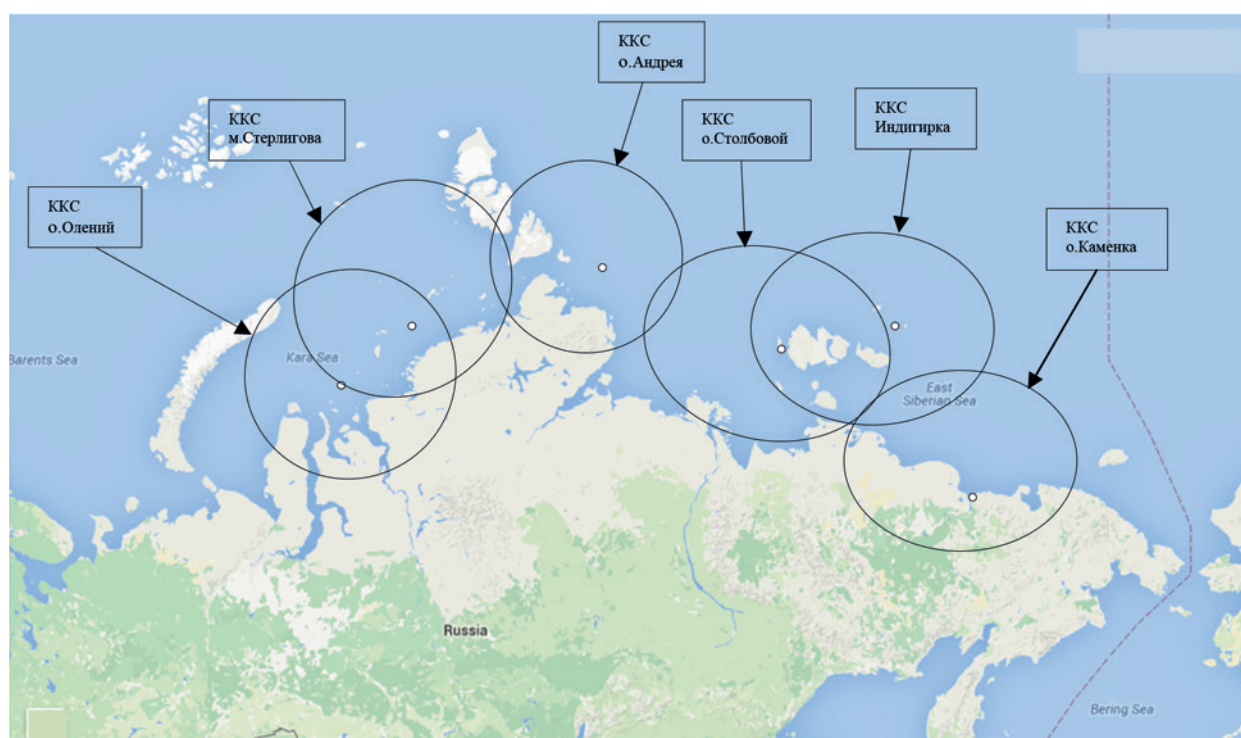


Рис. 1. Существующая картина дифференциального поля на СМП

В соответствии с принятой концепцией, сплошное радионавигационное поле дифференциальной поправки ГЛОНАСС должно образовываться путём построения сети локально-дифференциальных подсистем (ЛДПС). При этом должно обеспечиваться перекрытие рабочих зон ККС как минимум на 10 – 15 %, а достаточным перекрытием принято считать 30 % [1].

Принимая во внимание изложенное, предложим вариант построения системы мониторинга высокоточного дифференциального поля ГНСС ГЛОНАСС в рассматриваемом регионе. Для интеграции данных о состоянии ГНСС на всех участках СМП следует построить систему управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на СМП, которая может состоять из Центральной службы мониторинга дифференциального поля (ЦСМД) и цепи ККС [1].

ЦСМДП будет являться так называемым управляющим центром, функцией и задачей которого будет оценка коррекционных данных от базовых отсчетных станций, определение точности всех ГНСС сигналов, полученных от каждой отсчетной станции, расчёт погрешности и проверка

достоверности всей автоматизированной системы мониторинга параметров дифференциального поля на СМП [1].

В местах сопряжения, предполагаемых зон действия сигналов ККС, предлагается установить удалённые пункты контроля (УПК) на базе аппаратуры мобильного мониторинга дифференциального поля (АММ), также потребуется установка удалённых контрольно-управляющих станций (УКУС), для контроля целостности дифференциального поля (рис. 3). УКУС могут быть развёрнуты по административному признаку.

УКУС, по всей видимости, можно будет использовать для:

- повышения навигационной безопасности плавания, в том числе на подходах к портам, а также в других местах с ограниченной возможностью маневрирования;
- повышения точности навигационных данных;
- обеспечения контроля целостности ГНСС ГЛОНАСС;
- обеспечения координирования аварийно-спасательных работ;
- обеспечения высокоточной геодезической привязки средств навигационного оборудования на подходах к портовым комплексам;
- применения в автоматической идентификационной системе для автоматизации процесса опознавания и регистрации судов в зоне действия ККС;
- использования в составе систем управления движением судов для контроля за движением судов в подходных зонах к портам, местах интенсивного судоходства, в узкостях и экологически опасных районах.

Набор конкретных задач, решаемых УКУС, предлагается определять особенностями каждого района.

Мониторинг и контроль целостности ГНСС ГЛОНАСС предлагается осуществлять при помощи информационных каналов многофункциональной системы персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов (КА) на низких орбитах [2], построенной на базе малых спутников. Данная спутниковая система уже функционирует в районе СМП и устьевых районов северных рек. В данный момент действует ряд опытных зон, находящихся в районах, не охваченных наземными сетями GSM.



Рис. 2. Планируемая система мониторинга высокоточного дифференциального поля ГНСС ГЛОНАСС



Рис. 3. Схема структуры системы мониторинга дифференциального поля на СМП

В испытаниях отрабатывалась передача координатной информации, тревожных и текстовых сообщений с транспортных средств в центр мониторинга, расположенный в технопарке «Якутия». Также обеспечивалась и обратная связь (рис. 4).

Береговые средства связи в Арктике не охватывают большей части региона, действуя лишь на незначительном удалении от берега. К тому же, учитывая ландшафт (ледовое поле / открытая вода) развитие в регионе средств связи наземного базирования носит ограниченный характер — использование спутниковой связи является во многих случаях единственной альтернативой.

Связь в Арктике необходима как для мобильных, так и для стационарных пользователей, что делает востребованной решения на базе низкоорбитальной системы подвижной спутниковой связи «Гонец». Система обеспечивает полное покрытие Арктического региона, включая приполярный и полярный районы. Приоритетным направлением развития связи в Арктике является связанное обеспечение СМП.



Рис. 4. Спутниковая связь в Якутии. Судходная трасса по р. Лена с выходом на судходную магистраль СМП

Спутниковая система «Гонец» способна обеспечить на всем протяжении СМП и в любой точке Арктического региона [2]:

- обмен сообщениями с абонентами сетей общего пользования;
- доставку на суда и другим пользователям метеорологической информации;
- возможность отслеживать перемещение судов и других мобильных объектов посредством передачи их координат в диспетчерские центры средствами системы «Гонец»;
- обеспечение связи между судами и другими абонентами на Северном морском пути;
- возможность отправки сигналов бедствия;
- связь с береговыми службами;

- сбор и передачу различных телеметрических данных с судов (скорость хода, запас горючего и т. п.) и различных отраслевых объектов;
- экстренное оповещение регионов при угрозе ЧС.

Необслуживаемые терминалы «Гонец» могут быть установлены непосредственно на буюх или других специальных плавающих объектах, где осуществляется сбор данных о качестве параметров высокоточного навигационного поля. Для связи устанавливается штыревая антенна. Сбор данных может производиться как по запросу спутника, так и по мере накопления информации [2].

Внедрение ЦСМДП, по всей видимости, позволит:

- повысить уровень навигационной безопасности плавания на СМП;
- обеспечить контроль целостности ГНСС ГЛОНАСС [3], [4];
- обеспечить интегрирование данных о состоянии ГНСС ГЛОНАСС на всех участках СМП на основе информации, получаемой от ККС [5];
- обеспечить централизованный контроль и оптимальное управление работой ККС [6], [7];
- обеспечить контроль характеристик навигационного поля [8].

Построение системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на СМП должно обеспечить:

- решение большого круга задач (контроль перевозки опасных грузов, навигация судов морского флота, высокоточные гидрографические исследования);
- внедрение конкурентно способной российской аппаратуры;
- значительное снижение риска аварий судов, выполнение международных соглашений в области повышения уровня безопасности судоходства, повышения уровня экологической безопасности [9].

Построение такой системы на СМП не только существенно повысит уровень безопасности судоходства, но также позволит уменьшить риск экологических катастроф, обеспечит решение многих задач, поставленных в данном регионе и во всей стране в целом [10]. Представленная в данной статье система управления в полной мере соответствует Морской доктрине Российской Федерации, которая была представлена в Послании Президента РФ Федеральному собранию от 4 декабря 2014 г., также данная система управления в полной мере соответствует решению по итогам заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России «О разработке и реализации Национальной технологической инициативы» от 9 июня 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов, И. Г. Кузнецов // Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 2 (52). — С. 24–27.
2. Многофункциональная система персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов на низких орбитах «Гонец-Д1М» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gonets.ru/> (дата обращения: 12.11.2015).
3. Каретников В. В. Развитие и перспективы современных инфокоммуникационных систем для обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 74–77.
4. Каретников В. В. Перспективы комплексирования речных инфокоммуникационных технологий для повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2 (67). — С. 49–53.
5. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 525 с.

6. Разработка предложений и методов применения системы ГЛОНАСС, перспективных ГНСС и их функциональных дополнений в составе системы управления движением судов и АИС: отчет по НИР «Управление-река». — СПб.: СПГУВК, 2010. — 215 с.

7. Каретников В. В. Методы построения радионавигационных полей для информационного обеспечения автоматизированных систем управления движением судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / В. В. Каретников. — СПб., 2011. — 333 с.

8. Каретников В. В. Архитектура зон действия локальных дифференциальных подсистем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта / В. В. Каретников. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. — 178 с.

9. Кульнев В. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам / В. Кульнев, С. Михайлов // Беспроводные технологии. — 2006. — № 4. — С. 61–69.

10. Постановление Правительства РФ от 20 августа 2001 г. № 587 «О Федеральной целевой программе по использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах гражданских пользователей». — М.: Минтранс, 2001. — 5 с.

BUILDING A SISTEM OF MANAGEMENT AND CONTROL HIGH-PRECECISION DIFFERENTIAL FIELD GLONASS ON THE NORTHERN SEA ROUTE

Currently, the Northern Sea Route (NSR) annual growth volume of traffic carried by the marine fleet. Therefore there is an urgent need to build a system of management and control of high-precision differential field GLONASS. The construction of such a system would allow a qualitative way to exercise control of a differential field, which will increase the level of safety of navigation. On NSR implemented and operates five-control correction station (CCS), which form a differential field independently, with comprehensive control options differential field is almost not conducted. There are no technologies that allow for quality control and management of the differential field of GLONASS. This article presents the proposals that will form the NSR system management and control high-precision differential field GLONASS.

Keywords: monitoring system, NSR, control and correction station, differential field, safety of navigation.

REFERNCES

1. Karetnikov, V. V., I. V. Paschenko, A. I. Sokolov, I. G. Kuznetsov. "On the construction of automated monitoring system parameters precision navigation field." *Marine Radio-electronics* 2(52) (2015): 24–27.

2. Multifunctional personal satellite communication system and data from spacecraft in low orbits "Gonec DIM". Web. 12 Nov. 2015 <<http://www.gonets.ru/>>.

3. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. "Development and prospects of modern communicational systems to facilitate shipping on the inland waterways of Russia." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2010): 74–77.

4. Karetnikov, V. V., and V. A. Bekryashev. "Perspektivy kompleksirovaniya rechnyh infokommunikacionnyh tehnologij dlja povyshenija bezopasnosti sudohodstva na vnutrennih vodnyh putjah." *River Transport (XXIst century)* 2(67) (2014): 49–53

5. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. *Topologija differencialnyh polej i dalnost dejstvija kontrolno-korrektirujushhih stancij vysokotochnogo mestoopredelenija na vnutrennih vodnyh putjah*. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.

6. Razrabotka predlozhenij i metodov primenenija sistemy GLONASS, perspektivnyh GNSS i ih funkcionalnyh dopolnenij v sostave sistemy upravlenija dvizheniem sudov i AIS: otchet po NIR «Upravlenie-reka». SPb.: SPGUVK, 2010.

7. Karetnikov, V. V. Metody postroenija radionavigacionnyh polej dlja informacionnogo obespechenija avtomatizirovannyh sistem upravlenija dvizheniem sudov: Abstract of Dr. dissertation. SPb., 2011.

8. Karetnikov, V. V. *Arhitektura zon dejstvija lokalnyh differencialnyh podsystem, rabotajushhih dlja nuzhd vnutrennego vodnogo transporta*. SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2010.

9. Kulnev, V., and S. Michailov. "Analiz napravlenij i sostojanija razrabotok funkcionalnyh dopolnenij k sputnikovym radionavigacionnym sistemam." *Wireless Technologies* 4 (2006): 61–69

10. Russian Federation. Government resolution № 587. 20 August 2001. O Federalnoj celevoj programme po ispolzovaniju globalnoj navigacionnoj sputnikovoj sistemy GLONASS v interesah grazhdanskih polzovatelej. M.: Mintrans, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Пащенко Иван Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ivanpashchenko@rambler.ru
Соколов Андрей Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sokolov.ai@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karetnikov Vladimir Vladimirovich —
Dr. of Technical Science, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Pashchenko Ivan Vladimirovich —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ivanpashchenko@rambler.ru
Sokolov Andrei Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Karetnikov Vladimir Vladimirovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sokolov.ai@bk.ru

УДК 621.12.001

**В. В. Романовский,
М. А. Сюбаев,
И. М. Болвашенков**

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В статье рассматриваются вопросы определения параметров электрических машин используемых в настоящее время в гребных электрических установках судов ледового плавания и ледоколов. Как известно, основными аргументами в пользу применения повышенного напряжения (до 11 кВ) являются повышение единичной мощности электрических машин, уменьшение сечения проводов, повышение КПД всей установки и др. Однако использование классических методов анализа заданных конструкторскими решениями параметров электрических машин для мощностного ряда гребных электрических установок ледоколов позволило разработать конкретные рекомендации для выбора электрических машин переменного тока. Показана взаимосвязь электрических параметров главных электрических машин для наиболее эффективной работы в эксплуатационных режимах. Приведены конкретные рекомендации для судовладельцев, такие как необходимость представления обоснованных расчетов главных электрических машин, соответствующих различным напряжениям, экспериментальные материалы по определению их КПД, выбор частоты питающего напряжения и преобразователей гребной электроустановки.

Ключевые слова: гребные электрические установки, электрические машины, ледоколы

РЕШЕНИЕ задач строительства и модернизации гребных электрических установок (ГЭУ) уже начато, при этом проявляется явная тенденция применения электрических машин (ЭМ) с повышенными (более 1 кВ) паспортными значениями напряжения якорей (U). На судах ледового плавания и ледоколах применяются различного рода гребные электрические

установки [1] – [6]. При этом используются винторулевые колонки как электрического типа, так и механические [7], [8].

Основным аргументом в пользу применения повышенного U (до 11 кВ) напряжения являются: повышение единичной мощности ЭМ, уменьшение сечения проводов, повышение КПД всей установки и др. Для главных электрических машин ГЭУ среднее напряжение (от 1 кВ) приводит к уменьшению электрических потерь ЭМ ($p_э$), что не требует особого доказательства [9]. Однако необходимо отметить, что Правилами морского Регистра судоходства (Правила РМРС) совершенно обоснованно предусмотрены дополнительные требования к судовому электрооборудованию (в том числе ЭМ ГЭУ) на напряжение выше 1000 В, которые явно повышают как первоначальную стоимость ГЭУ, так и соответствующие эксплуатационные затраты. Последние будут проявляться в течение длительного (не менее 25 лет) срока службы ГЭУ.

При выборе напряжения главных генераторов (ГГ) и гребных электродвигателей (ГЭД) наряду с $p_э$ нужно учитывать влияние выбора уровня напряжения U на массогабаритные показатели ЭМ и их КПД. Якорные обмотки синхронных и асинхронных ЭМ по принципу построения и теории одинаковы. Поэтому рассмотрение этого вопроса далее проводится на примере синхронных ЭМ ГЭУ, поскольку основные выводы могут использоваться как к синхронным, так и к асинхронным ЭМ. Массогабаритные показатели синхронных машин (СМ) во многом определяются объемом активного ядра магнитопровода, т. е. диаметром расточки активной стали D и ее расчетной длиной $l_δ$. Классическими методами проектирования СМ величина D определяется по графикам, построенным на основе опыта строительства ЭМ, в зависимости от расчетной мощности СМ и числа полюсов. Число полюсов $2p$ определяется синхронной частотой вращения СМ (n).

При выбранных значениях n и D величина $l_δ$ определяется выражением

$$l_δ = \frac{6,1 \cdot S_n}{\alpha_э k_D k_1 A B_δ D^2 n}, \quad (1)$$

где S_n — расчетная номинальная электромагнитная мощность СМ; $\alpha_э$ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; $k_φ$ — коэффициент формы поля; k_1 — обмоточный коэффициент; A — линейная нагрузка якоря; $B_δ$ — значение магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке СМ.

Проведенные для СМ различной мощности расчеты показали, что влияние повышения величины напряжения U на массу СМ незначительно, причем при повышенном значении U масса ЭМ может быть даже несколько больше. При уменьшении тока фазы якоря СМ (при повышенном значении напряжения) сечение проводников секций якоря можно снижать, за счет чего и достигается уменьшение массы проводников (т. е. меди или алюминия). Кроме того, при этом в случае сохранения постоянства коэффициента заполнения паза (что часто практикуется) уменьшается и объем магнитопровода пазовой зоны. Однако на массогабаритные показатели ЭМ в целом это не оказывает значимого влияния. Так, например, по расчетам, проведенным для СГЭД мощностью 2 МВт и $n = 150$ об/м при напряжениях 650 В и 3 кВ, массы соответственно были равны 9,54 и 9,8 т. Эти результаты подтверждаются и каталожными данными. Так, например, масса СМ типа СБГД мощностью 6,3 МВт при $U = 6,3$ кВ равна 27,7 т, а при $U = 10,5$ кВ — 28 т. Таким образом, повышение напряжения ЭМ практически не дает выигрыша по массогабаритным показателям.

По влиянию выбора U на КПД СМ можно отметить следующее. КПД СМ, как известно, определяется соотношением полезной и полной мощностей, которая рассчитывается с учетом всех потерь. В СМ суммарные потери $P_Σ$ определяются соотношением

$$P_Σ = P_э + P_с + P_{мех} + P_в + P_д, \quad (2)$$

где $P_э$ — электрические потери в меди или алюминии обмотки якоря, пропорциональные квадрату тока якоря, т. е. $P_э \sim I^2$; $P_с$ — потери в стали СМ, которые определяются соотношением

$$P_с = k p_{уд} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B^2 G, \quad (3)$$

где k — опытный коэффициент, зависящий от обработки стали; $P_{уд}$ — удельные потери в стали; f — частота перемагничивания стали; G — масса активного ядра магнитопровода; B — магнитная индукция якоря; $P_{мех}$ — механические потери; $P_{в}$ — потери на возбуждение СМ; $P_{д}$ — добавочные потери (электрические, в стали, механические).

Потери в стали, при постоянстве расчетного значения частоты f , которая принимается равной номинальной частоте по паспорту СМ, пропорциональны квадрату индукции, т. е. $p_c \sim B^2$, т. е. влияние магнитной индукции на КПД велико. Механические потери в СМ определяются потерями на трение (в подшипниках, трение вращающихся элементов конструкции СМ о воздух, трение в щеточных контактах). Все составляющие основных механических потерь определяются расчетным путем (каждый своим методом), причем все эти методы являются сравнительно приближенными. Поэтому при расчетах значение $P_{мех}$ принимается эмпирическим путем. Практического влияния напряжение U СМ на механические потери при одних и тех же основных паспортных данных СМ (т. е. мощности и частоты вращения) нет, поэтому необходимости дополнительное рассмотрение роли $P_{мех}$ в данном случае нет. Потери на возбуждение определяются так же, как и потери $P_{с}$. Дополнительные потери (которые не могут быть учтены при расчете основных потерь) обусловлены колебаниями элементов линии вала СМ, пульсациями поля, неравномерностью распределения плотности тока по сечению токопроводящих элементов и т. д. Расчет $P_{доп}$ сравнительно сложен, весьма приближенный и поэтому принимается эмпирическим путем в пределах 1 % от паспортной мощности. Поэтому влияние $P_{доп}$ в рассматриваемом случае мало.

В данном случае решающими являются потери электрические $P_{с}$ и потери в стали якоря $P_{с}$, поэтому их влияние на КПД СМ и в экономическом плане целесообразно рассмотреть. При повышении напряжения ток якоря уменьшается, соответственно (по квадратичной зависимости от тока) уменьшается величина $P_{с}$. Следовательно, это приводит к повышению КПД. Это ясно и очевидно. Что касается потерь в стали $P_{с}$, этот вопрос обстоит несколько сложнее. ЭДС фазы якоря СМ определяется выражением

$$E_1 = 4,44 \cdot k_1 \cdot w_1 \cdot f_1 \Phi, \quad (4)$$

где k_1 — обмоточный коэффициент; w_1 — число последовательно соединенных витков фазы якоря; Φ — магнитный поток, пропорциональный магнитной индукции B .

Практически ЭДС фазы $E_1 = (0,95 \div 0,97) \cdot U_{\phi}$, т. е. значение ЭДС E_1 близко к значению напряжения U_{ϕ} . Повышению значения напряжения СМ U , и напряжения U_{ϕ} соответствует повышение E_1 . Указанное может быть достигнуто соответствующим изменением числа витков w_1 и Φ (магнитной индукции B в случае сохранения постоянства размеров активного ядра магнитопровода машины). Напомним при этом, что при повышении напряжения СМ ток фазы понижается. Таким образом, при повышении напряжения СМ требуется повышение величины w_1 . При сохранении размеров активного ядра СМ можно дополнительно увеличить величину магнитной индукции (B). Последнее приводит к повышению потерь в стали (пропорциональных квадрату B). Обычно в связи с этим величина B не превышает по этой причине 1,9 Тл.

Повышение значения магнитной индукции приводит также к повышению потерь на возбуждение. При этом весьма существенно проявляется (неблагоприятно) нелинейность характеристики намагничивания СМ. Принципиально можно получить необходимую ЭДС E_1 без повышения значения B , но это возможно при заметном увеличении числа витков w_1 , соответственно повышению индуктивности фазы (зависимость квадратичная) и, что важно, повышению расхода меди обмотки. Отметим при этом, что расход меди является фактором, определяющим, в основном, себестоимость машины.

Проведенные для синхронного ГЭД мощностью 3 МВт расчеты показали, что при номинальном напряжении 6,6 кВ по сравнению с 600 В КПД ГЭД получается примерно на 2 % выше. Если величину индукции не повышать вообще, можно получить повышение КПД даже до 3 – 4 % (увеличенном w_1). Но если уровень магнитной индукции не повышать, расход меди увеличивается. Проведенные расчеты для синхронных ГЭД мощностью 1, 2 и 3 МВт при частоте вращения

$n = 150$ об/м показали, что даже при сохранении значения B и повышении напряжения от 650 В до 3 кВ (увеличивая лишь w_1) расход меди может быть уменьшен почти в три раза. Таким образом, применение повышенного напряжения электромашин ГЭУ может существенно уменьшить их себестоимость за счет уменьшения расхода меди. Расход меди уменьшается, если при этом уровень магнитной индукции будет повышен, но это повлечет снижение КПД ЭМ.

Исходя из сказанного, можно сделать выводы.

Применение повышенного напряжения главных электромашин ГЭУ может привести к существенному снижению их себестоимости за счет экономии меди якорных обмоток ЭМ. Производителю ЭМ это явно выгодно. Что касается интересов судовладельца, то выгода от использования повышенного напряжения не настолько очевидна. Применение повышенного напряжения ЭМ ГЭУ дает в лучшем случае повышение КПД ЭМ на 2 – 3 %. Если же учесть, что КПД СМ составляет более 90 % и значительную приближенность методов расчета потерь ЭМ, т. е. основания полагать, что эффект будет даже менее значимый. Если при этом иметь в виду дизель-генератор ГЭУ переменного тока, то у него КПД вообще составляет 25 – 30 %. В этом случае эффект указанного повышения КПД вообще сглаживается и это при необходимости четкого выполнения указанных дополнительных требований РМРС.

При использовании частотно-регулируемой гребной электрической установки гребные синхронные двигатели наиболее эффективны [10], что показал опыт эксплуатации атомных ледоколов типа «Таймыр» [11]. Классическими методами проектирования синхронных машин предусматривается определение диаметра расточки D в зависимости от расчетной мощности, определяемой номинальной мощностью в данном случае ГЭД и числа полюсов $2p$. При этом число полюсов $2p$ определяется известным выражением $p = 60f/n$, т. е. в зависимости от частоты f питающего ГЭД напряжения U . Таким образом, при заданном значении частоты вращения ГЭД, т. е. величины n , количество полюсов ГЭД определяется выбранным значением частоты f . При этом необходимо отметить одно обстоятельство, вытекающее по ряду обстоятельств из опыта проектирования машин переменного тока и заключающееся в том, что диаметр расточки ядра D существенно снижается по мере уменьшения числа p , а следовательно, и f . Так, например, для синхронного ГЭД мощностью 2 кВ·А соотношение диаметров при шести- и восьмиполюсном исполнении может быть равно $D_6/D_8 = 0,83$.

Таким образом, при уменьшении выбранного значения f соответственно изменяются величина диаметра расточки D и число полюсов $2p$. Величина внешнего диаметра магнитопровода статора D_c , в свою очередь, определяется выражением $D_c = k_q \cdot D$, где коэффициент k_q является функцией числа полюсов. Коэффициент k_q выбирается по таблицам, составленным по опыту проектирования машин переменного тока. При выбранных значениях n и D расчетная длина активной стали l_δ определяется выражением

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot S_n}{\alpha_\delta k_\phi k_1 AB_\delta D^2 n}, \quad (5)$$

где S_n — расчетная электромагнитная мощность ГЭД; α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_ϕ — коэффициент формы поля; k_1 — обмоточный коэффициент якоря ГЭД; A — линейная нагрузка якоря; B_δ — значение магнитной индукции в зазоре ГЭД при номинальной нагрузке.

Для численной оценки влияния выбора f на основные массогабаритные показатели синхронного ГЭД мощностью 2 МВт, частотой вращения 130 об/мин, напряжением 800 В проведены соответствующие расчеты, результаты которых приведены в таблице.

Параметры синхронного ГЭД при заданных частотах питающего напряжения

f , Гц	15	20	25	30	35	40
D , м	2,04	2,4	2,5	2,66	3	3,5
Полная длина статора, м	3,7	3,2	3,1	3	2,9	2,8
Полная масса ГЭД, т	65,6	62,6	62,5	61,6	62,2	64

Как видно из приведенной таблицы, выбор значения частоты (в пределах рабочих характеристик) не имеет решающего значения для уровня основных массогабаритных показателей синхронного ГЭД. Зависимости полной массы синхронного ГЭД и соответственно его габаритных размеров от частоты напряжения питания ГЭД существенно нелинейны, и их минимальные, наилучшие значения для каждой машины могут быть своими.

По выбору значения частоты напряжения якоря ГЭД могут быть сформулированы следующие основания. Известно, что при частотном регулировании ГЭД переменного тока возможно применение двух видов преобразователей частоты (ПЧ), питающих якорную обмотку: непосредственных преобразователей частоты (НПЧ) и преобразователей частоты со звеном постоянного тока. Основными достоинствами по сравнению с ПЧ со звеном постоянного тока НПЧ являются:

- однократное преобразование энергии;
- более простое схемное решение и меньший состав основной элементной базы.

В результате этого НПЧ могут быть надежнее, дешевле и проще в эксплуатации.

Необходимо особо отметить, что у НПЧ есть один, наиболее существенный недостаток, заключающийся в том, что максимальное значение частоты на выходе НПЧ равно около 23 Гц при стандартной входной частоте 50 Гц. В ПЧ со звеном постоянного тока применяется двукратное преобразование энергии, вследствие чего, хоть и в незначительной мере (около 0,5 %) снижается КПД ПЧ. Но в ПЧ со звеном постоянного тока при частоте входного питающего напряжения $f_{\text{пит}}$, равной 50 Гц, можно получить частоту выходного напряжения $f_{\text{вых}} = 50$ Гц. Вследствие этого в этом случае можно применять ГЭД с паспортной общепромышленной частотой 50 Гц. С учетом указанного, необходимо сопоставление двух вариантов ГЭД: с паспортными значениями частоты 50 Гц и около 20 Гц и при одинаковых значениях напряжения U .

ЭДС якоря определяется соотношением

$$E = k \cdot w \cdot f \cdot \Phi, \quad (6)$$

где k — постоянный коэффициент; w — число последовательно соединенных витков фазной обмотки; Φ — магнитный поток при соответствующем значении магнитной индукции (B).

С точностью, допустимой для инженерных расчетов, величина ЭДС может быть принята равной питающему напряжению, т. е. $E \approx U$. Следовательно, если величину частоты f принять равной 20 Гц (при применении НПЧ), т. е. уменьшенной, сохранение значения E может быть выполнено соответствующим увеличением числа витков w или магнитного потока Φ (магнитной индукции B), или их совместным увеличением. Увеличение числа витков w приведет к повышению расхода меди, необходимой для обмотки якоря. Отметим при этом, что именно стоимость меди, в основном, определяет первоначальную стоимость машины в целом. Совершенно очевидно, что производитель электромашин не заинтересован решить этот вопрос таким путем.

Применение повышенного значения Φ , соответственно магнитной индукции B , приводит к возрастанию потерь на возбуждение и потерь в стали магнитопровода p_c . С учетом нелинейности характеристики намагничивания, а также условия, что $p_c \sim B^2$, потери в стали, как показывают расчеты, могут возрасти весьма существенно, заметно снижая КПД машины в целом. Последние факторы будут затрагивать в большей мере интересы судовладельца, использующего ГЭД в течение длительного времени. Окончательное заключение по этому вопросу может быть сделано на основе результатов расчетов. Проведенные с целью численной оценки влияния этого фактора расчеты синхронных ГЭД с номинальными мощностями 3 МВт, 1,55 МВт, 1,17 МВт, соответствующими ГЭД современных ледоколов на номинальные частоты 20 Гц и 50 Гц, показали, что при номинальной частоте $f_{\text{пит}} = 50$ Гц и определенном выборе размеров активного ядра магнитопровода синхронного ГЭД можно получить повышение КПД ГЭД в среднем на 1,5 %. Таким образом, при применении ПЧ со звеном постоянного тока и соответственно принимая значение номинальной частоты питающего напряжения равной 50 Гц, можно получить общее КПД ГЭУ даже несколько выше, чем при применении НПЧ. Как уже указывалось, некоторый выигрыш может быть получен и по массогабаритным показателям. Наряду с этим нужно отметить, что частотно-регулируемые судовые электроприводы с НПЧ применяются сравнительно широко.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа параметров главных электрических машин переменного тока гребных электрических установок показывают:

- заказчику (судовладельцу) гребной электрической установки должны быть представлены расчеты главных электрических машин, соответствующих различным напряжениям, причем при одинаковых паспортных данных ЭМ потери, определяемые эмпирически, должны быть приняты равными;
- при возможности должны быть рассмотрены и сопоставлены экспериментальные материалы по определению КПД ЭМ;
- применение электромашин ГЭУ с напряжением якорей выше 1 кВ должно обосновываться с учетом эксплуатационных показателей, а не стоимостных;
- при выборе преобразователей частоты целесообразно исходить из общей структуры гребной электроустановки и требований к качеству электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // Vehicle Power and Propulsion conference (VPPC), 2014 IEEE. — IEEE, 2014. — Pp. 1–9.
2. Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas / I. Bolvashenkov, H. G. Herzog, A. Rubinraut, V. Romanovskiy // Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 1–4.
3. Суда спасатели: новые подходы к концепции создания / Д. Гармаш, Т. Наумова, М. Темкин, П. Маргулев // Морской флот. — 2014. — № 5. — С. 36–45.
4. Использование гибридных установок для судов с широким диапазоном условий работы // Ship and Offshore. Выпуск для России. — 2015. — С. 12–13.
5. Романовский В. В. Электрооборудование морских буровых установок / В. В. Романовский, В. Н. Куракин, А. В. Григорьев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 165 с.
6. Лазаревский Н. А. Построение гребных электрических установок переменного тока без использования трансформаторов / А. Н. Лазаревский, В. А. Хомяк, И. В. Гагаринов // Судостроение. — 2012. — № 1. — С. 33–37.
7. Adnanes A. K. Maritime electrical installations and diesel electric propulsion / A. K. Adnanes. — ABB, 2003. — 110 p.
8. Романовский В. В. Маневренные характеристики системы электродвижения с винторулевыми колонками / В. В. Романовский, Д. А. Ткаченко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3. — С. 54–59.
9. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. — СПб.: Питер, 2010. — 350 с.
10. Бакшанов А. А. К выбору гребных электродвигателей для ледоколов / А. А. Бакшанов, В. В. Романовский // Материалы науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со Дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб., 2013. — С. 116–122.
11. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов: учеб. пособие / А. С. Быков, В. В. Башаев, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.

SELECTION BASIC DATA OF ELECTRICAL MACHINES FOR ELECTRICAL PROPULSION SYSTEMS

In article are considered data of electrical machines for electrical propulsion systems using now on ice ships and icebreakers.

It is known, that a basic arguments for using high-voltage (to 11 kV) namely is: high ordinary power of mains electrical machines for electrical propulsion systems, diminution gauge of wires, increasing of power factor and efficiency.

However, using of classic theory of electrical machines permit to analyse determine constructive decisions of electrical data for determine power numbers machines for ice ships and icebreakers. Now shows interconnected between different kinds characteristic of electrical parameters electrical machines for better used in exploitation.

Presented a concreteness reports for shipowners about rated power and voltage of mains electrical machines. And also materials about efficiency, frequency and convertors for electrical propulsion systems of ice ships and icebreakers.

Keywords: electrical propulsion system, electrical machines, icebreakers.

REFERENCES

1. Bolvashenkov Igor, H.G. Herzog, A. Rubinraut, and V. Romanovskiy. "Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems." *Vehicle Power and Propulsion conference (VPPC), 2014 IEEE*. IEEE, 2014: 1–9.
2. Bolvashenkov Igor, H.G. Herzog, A. Rubinraut, and V. Romanovskiy. "Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas." *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on*. IEEE, 2014: 1–4.
3. Garmash, D., T. Naumova, M. Temkin, and P. Martulev. "Suda spasateli: novye podhody k koncepcii sozdanija." *Morskoy flot* 05 (2014): 36–45.
4. "Employment hybrid installations for universal ships." *Ship and Offshore. Publication for Russia* (2015): 12–13.
5. Romanovskij, V. V., Kurakin V. N., and Grigoriev A. V. *Elektrooborudovanie morskikh burovyh ustanovok*. SPb.: Izdatelstvo GUMRF im. adm. S.O.Makarova, 2015.
6. Lazarevsky, N. A., V. A. Khomyak, and I. V. Gagarinov. "Creation of alternating-current electrical propulsion plants without transformers." *Sudostroenie* 1 (2012): 33–37.
7. Adnanes, Alf Kare. *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*. ABB, 2003.
8. Romanovskiy, V. V., and D. A. Tkachenko. "Maneuverable characteristics of system of electromovement with vinto-helmsmen columns." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2011): 54–59.
9. Voldek, A. I., and V. V. Popov. *Jelektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnik dlja VUZov*. SPb.: "Piter", 2010.
10. Bakshanov, A. A., and V. V. Romanovskij. "K vyboru grebnyh jelektrovdigatelej dlja ledokolov / A. A. Bakshanov." *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 150-letiju so dnja rozhdenija akademika A.N.Krylova*. SPb., 2013: 116–122.
11. Bykov, A. S., V. V. Bashaev, V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskij. *Grebnye jelektricheskie ustanovki atomnyh ledokolov: uchebnoe posobie*. SPb.: «Jelmor», 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
vromanovsky@mail.ru
Сюбаев Мирза Алимович —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
SubaevMA@gumrf.ru
Болвашенков Игорь Маркович —
кандидат технических наук, доцент.
Технический университет, г. Мюнхен (ФРГ)
Abbat58@mail.ru

IFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovskiy Viktor Viktorovich -
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
vromanovsky@mail.ru
Sjubaev Mirza Alimovich -
PhD, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
SubaevMA@gumrf.ru
Bolvashenkov Igor Markovich -
PhD, associate professor.
Technische Universitaet Muenchen
Abbat58@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2015 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСКУССТВЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье представлено обоснование предложенного авторами метода искусственного нагружения однофазных асинхронных электродвигателей после ремонта. Основной целью статьи является проведение исследований по функционированию обмоток электрических машин под номинальным током. При использовании метода искусственного нагружения возможно получение режима, эквивалентного нагрузочному. Эквивалентный ток статора электродвигателя в таком режиме будет соизмерим с номинальным током. Для подтверждения представленного авторами метода приводятся результаты моделирования процесса искусственного нагружения однофазного асинхронного электродвигателя. Главными задачами исследования являются определение параметров схемы замещения электродвигателя и получение оптимальных параметров процесса искусственного нагружения. Результатами решения поставленных авторами задач являются модель асинхронного однофазного электродвигателя, основные параметры которой совпадают с номинальными, и графики эквивалентного тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, динамическое нагружение, режим противовключения, электрический ток, механическая мощность, коммутация, частота сети.

В НАСТОЯЩЕЕ время испытания асинхронных трёхфазных двигателей (АТД) проводятся по упрощённому сценарию. Причиной этого является сложность испытательного оборудования [1]. В то же время, наряду с уменьшением затрат на оборудование увеличивается число электродвигателей, выходящих из строя. Это приводит к увеличению количества серьёзных аварий на судах и, как следствие, простоя судов.

Однофазные асинхронные электродвигатели (ОАД) применяются только для вспомогательного оборудования судов [2], поэтому выход из строя таких электродвигателей не повлечёт за собой существенных экономических последствий. В то же время проведение проверки однофазных асинхронных электродвигателей может быть оправдано для крупных судоремонтных предприятий. Для этого необходимо большое количество машин трёхфазного и однофазного тока, подвергающихся ремонту. В этом случае, при отсутствии должного контроля технического состояния электродвигателей, количество вышедших из строя единиц окажется существенным [3], что не может быть не замечено судовладельцами и представителями судоремонтных предприятий. Таким образом, процесс испытаний однофазных электродвигателей должен быть нетрудоёмким и в то же время надёжным [4]. Это условие обеспечит большой оборот испытуемого оборудования, что повысит целесообразность испытания электродвигателей, которые нашли применение в маломощных электроприводах вспомогательных механизмов. Кроме того, оборудование испытательного стенда, где проходят испытание асинхронные двигатели, должно иметь как можно меньшую стоимость. Всё перечисленное возможно только при использовании метода искусственного нагружения (ИН) [5]. Этот метод уже апробирован авторами на судоремонтных предприятиях Камчатского края и одинаково применяется как для трёхфазных, так и для однофазных асинхронных электродвигателей.

Для определения дальнейшего направления исследования были рассмотрены характеристики двигателей при различных способах включения. ОАД с пусковой обмоткой являются достаточно распространёнными (рис. 1, а), это объясняется простотой схемы включения. Возникновение пускового момента двигателя обеспечивается фазовым сдвигом между токами и магнитодвижущими силами пусковой и рабочей обмоток. Это достигается за счет выполнения неравенств $r_w < r_s$ и $x_w > x_s$, где r_w , r_s — активные сопротивления рабочей и пусковой обмоток соответственно, x_w ,

x_s — индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток соответственно. Необходимым требованием к токовым реле, осуществляющим коммутацию обмотки S при пуске асинхронного двигателя (АД), является высокая надёжность.

Так как пусковая обмотка рассчитана на работу в кратковременном режиме, то в случае выхода из строя реле произойдет перегрев и отказ пусковой обмотки. Однофазный асинхронный двигатель с дополнительным резистором имеет низкие эксплуатационные показатели. При этом коэффициент мощности ($\cos\phi$) равен примерно 0,5 – 0,6; значение КПД варьируется в пределах 0,4 – 0,7; пусковая способность M_n/M_n — в пределах 1 – 1,5.

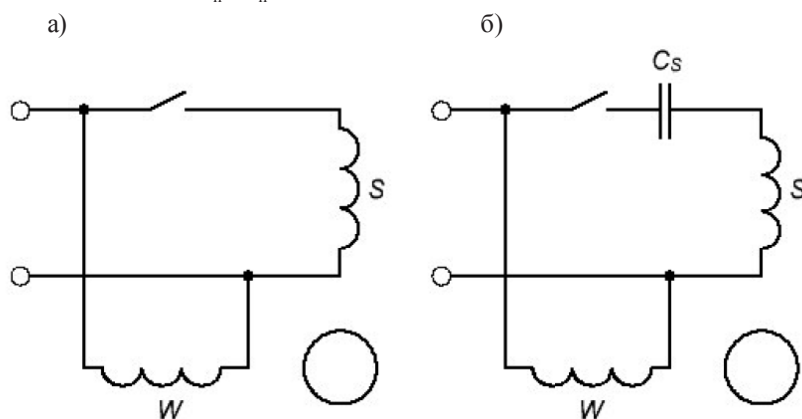


Рис. 1. Схемы включения ОАД с КЗ ротором:
а) с пусковой обмоткой; б) с пусковым конденсатором

Простота конструкции могла стать определяющим фактором распространения таких видов ОАД, но необходимо отметить, что рассматриваемые двигатели имеют существенные недостатки. При работе в составе электропривода возможен выход из строя ввиду низкого пускового момента, так как при наличии значительных сил сопротивления ротора электромагнитный момент двигателя будет слишком мал для их преодоления, и двигатель перейдет в режим короткого замыкания.

Всё это объясняет распространение ОАД с пусковым конденсатором, которые лишены перечисленных недостатков (рис. 1, б). В цепи пусковой обмотки S таких двигателей установлен конденсатор C , правильный подбор ёмкости которого обеспечивает необходимые условия пуска. Такие ОАД имеют эксплуатационные характеристики аналогичные характеристикам ОАД с дополнительным сопротивлением пусковой обмотки, но пусковые характеристики значительно выше. При этом пусковая способность (M_n/M_n) достигает значений от 1 до 1,5. Эксплуатационные характеристики таких ОАД аналогичны рассмотренным ранее, за исключением высокой пусковой способности M_n/M_n (от 2 до 2,5). Данный тип АДО имеет существенный недостаток: для создания кругового вращающегося магнитного поля используются два конденсатора значительных размеров. Наличие дополнительных элементов значительно снижает эксплуатационную надёжность, что нередко является причиной выхода из строя электродвигателя. Именно это объясняет наличие большого количества таких двигателей на полках судоремонтных предприятий.

В ходе данного исследования были решены две основные задачи. Первая — определение параметров схемы замещения (СЗ) ОАД. Вторая — определение параметров режима искусственного нагружения. В системе уравнений (1) для СЗ ОАД первый индекс обозначает принадлежность к одному из опытов: 0 — параметры и переменные, измеренные и рассчитанные из опыта ХХ, k — параметры и переменные, измеренные и рассчитанные из опыта КЗ. Вторые индексы обозначают принадлежность к статорным обмоткам двигателя: w — к рабочей обмотке, s — к пусковой обмотке.

$$\begin{aligned}
 z_{0w} &= \frac{U_{0w}}{I_{0w}}; & r_{0w} &= \frac{P_{0w}}{I_{0w}^2}; & x_{0w} &= \sqrt{z_{0w}^2 - r_{0w}^2}; \\
 z_{kw} &= \frac{U_{kw}}{I_{kw}}; & r_{kw} &= \frac{P_{kw}}{I_{kw}^2}; & x_{kw} &= \sqrt{z_{kw}^2 - r_{kw}^2}; \\
 x_{0w} &= x_{m[w]} + x_{s\sigma w}; & x_{kw} &= x_{s\sigma w} + x_{r\sigma[w]}; \\
 r_{0w} &= r_{m[w]} + r_{s\sigma w}; & r_{kw} &= r_{s\sigma w} + r_{r[w]}; \\
 x_{s\sigma w} &= x_{r\sigma[w]}; & r_{s\sigma w} &= r_{r[w]}; & x_{s\sigma s} &= x_{r\sigma[s]}; & r_{s\sigma s} &= r_{r[s]}; \\
 z_{0s} &= \frac{U_{0s}}{I_{0s}}; & r_{0s} &= \frac{P_{0s}}{I_{0s}^2}; & x_{0s} &= \sqrt{z_{0s}^2 - r_{0s}^2}; \\
 z_{ks} &= \frac{U_{ks}}{I_{ks}}; & r_{ks} &= \frac{P_{ks}}{I_{ks}^2}; & x_{ks} &= \sqrt{z_{ks}^2 - r_{ks}^2}; \\
 x_{0s} &= x_{m[s]} + x_{s\sigma s}; & x_{ks} &= x_{s\sigma s} + x_{r\sigma[s]}; \\
 r_{0s} &= r_{m[s]} + r_{s\sigma s}; & r_{ks} &= r_{s\sigma s} + r_{r[s]};
 \end{aligned} \quad (1)$$

Для учёта насыщения от полей прямой и обратной последовательностей к ОАД подключались два источника напряжения, сдвинутых во времени на $\frac{1}{4}$ периода, а амплитуды напряжений источников подбирались с учётом обеспечения равенства МДС обеих обмоток.

Приведённые уравнения позволяют создать математическую модель ОАД, пригодную для анализа основных режимов работы ОАД, однако при исследованиях систем автоматизированного управления ОАД и формирования его пуско-тормозных процессов необходимо учесть изменяющееся насыщение магнитной системы. С этой целью в модель вводится выраженная в относительных единицах и аппроксимированная кривая намагничивания, с помощью которой определяется зависимость

$$X_m = f(\Psi), \quad (2)$$

где X_m — индуктивное сопротивление рассеяния фазы, Ψ — фазовый сдвиг между напряжением и током в фазе.

На рис. 2 представлена компьютерная модель, разработанная в Simulink [6].

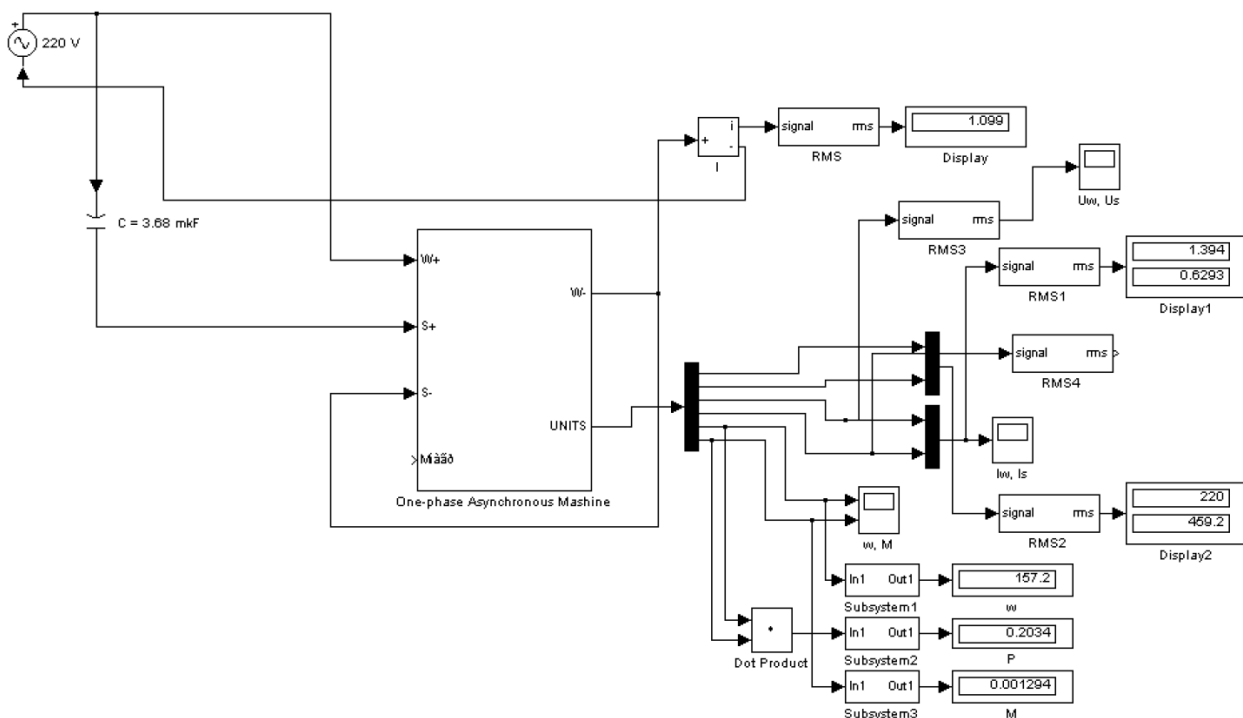


Рис. 2. Модель однофазного электродвигателя в Simulink

Моделирование процесса искусственного нагружения невозможно без наличия адекватной модели испытуемого ОАД [7]. Разработанная модель прошла проверку на адекватность путём получения номинальной частоты вращения и номинального тока (НТ) при подключении номинальной нагрузки. Результаты проверки модели ОАД АВЕ-071 ($P_n = 180$ Вт; $n_n = 1350$ об/мин; $I_n = 1,38$ А; $U_n = 220$ В; $\cos\varphi_n = 0,94$; $\eta_n = 0,63$) представлены на рис. 3.

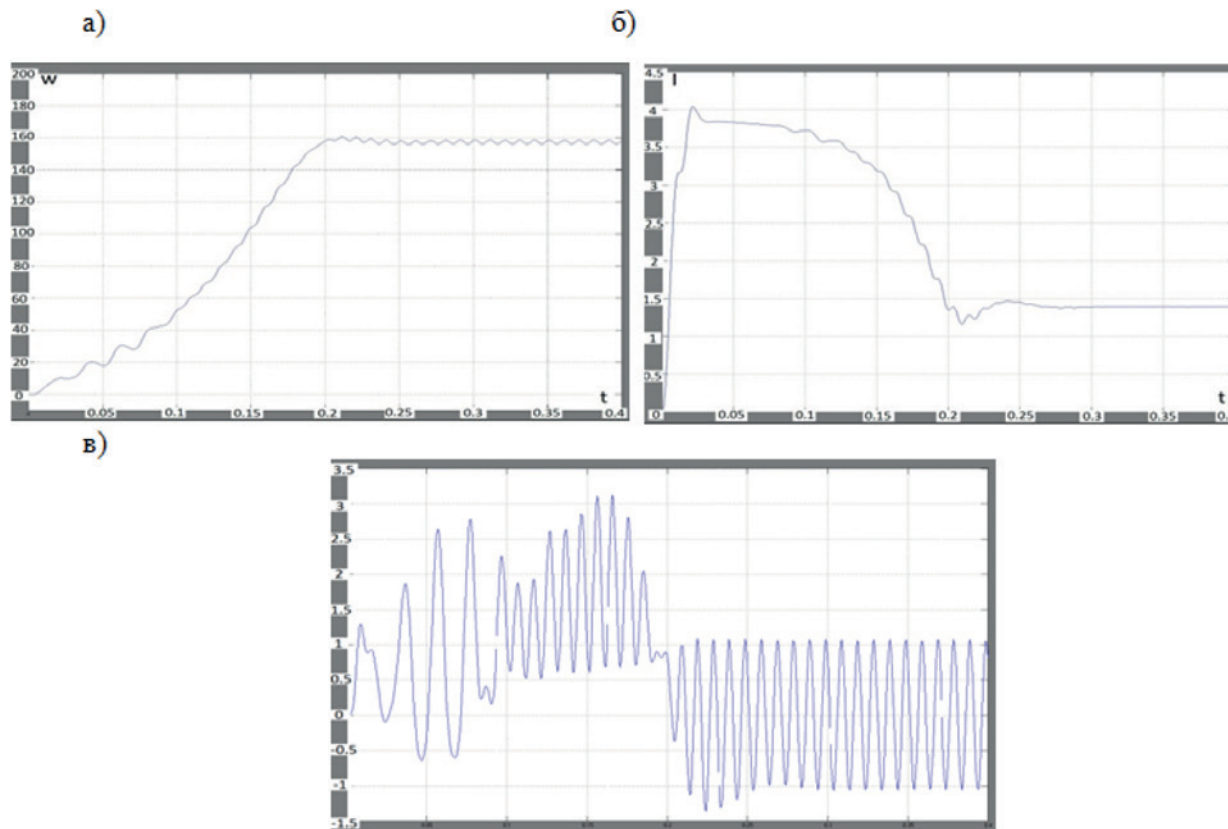


Рис. 3. Скорость вращения (а), ток статора (б) и напряжение на статоре (в) в номинальном режиме ОАД

На рис. 3 видно, что параметры представленной модели совпадают с номинальными параметрами с некоторыми допущениями. Из результатов моделирования можно сделать вывод о соответствии представленной математической модели ОАД реальным ОАД. На втором этапе целью моделирования процесса ИН ОАД являлось получение среднего тока на статоре, значение которого соизмеримо с номинальным значением.

В настоящее время перспективными являются частотные методы, предполагающие питание электродвигателя от преобразователя частоты. Наиболее перспективными являются схемные решения, не требующие измерения механических параметров, в частности, частоты вращения вала двигателя. Основными параметрами, используемыми для оценки технического состояния, являются энергетические параметры, токи и напряжения. Метод ИН предполагает введение возмущающих воздействий на работу ОАД с целью получения режима, соответствующего режиму нагружения с соответствующими ему параметрами.

На рис. 4 представлена механическая характеристика электродвигателя в режиме ИН.

Первоначально электродвигатель работает на своей механической характеристике, его номинальному моменту соответствует точка *b*. Далее путём изменения частоты питающего напряжения двигатель переходит на работу по второй механической характеристике, переводится в режим рекуперативного торможения. На отрезке *cd* происходит торможение до установившейся скорости в соответствии с частотой сети [8].

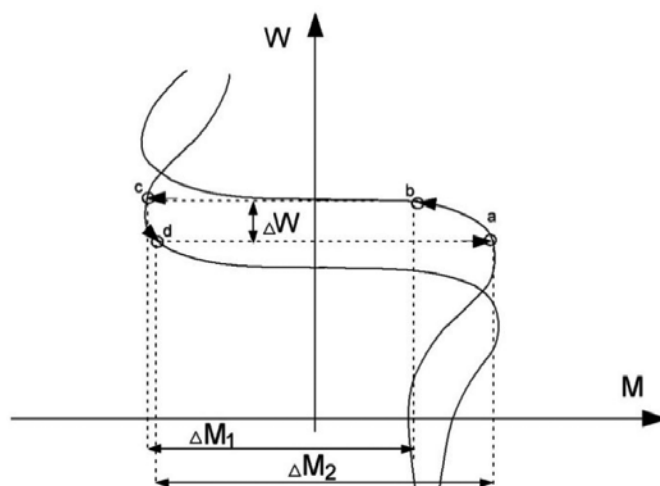


Рис. 4. Механическая характеристика АД в режиме искусственного нагружения путём изменения частоты питающего напряжения

Разгон электродвигателя осуществляется путем изменения частоты питающего напряжения на первоначальную. Двигатель переходит в точку *a* характеристики и начинает разгон до точки *b*. Для поддержания непрерывного режима динамического нагружения цикл повторяется.

На рис. 5 представлены результаты моделирования ИН ОАД [9].

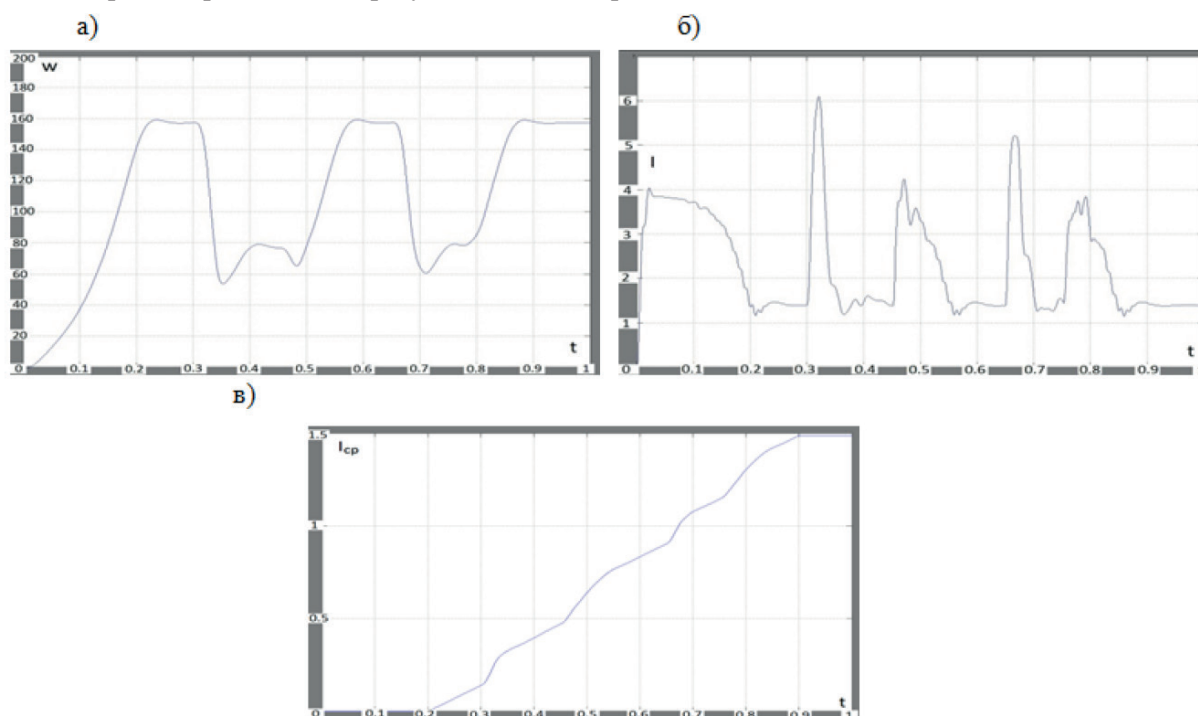


Рис. 5. Скорость вращения (а), ток статора (б) и эквивалентный ток (в) статора, полученные при моделировании испытаний ОАД

ИН производилось путём циклического изменения частоты питающего напряжения, что привело к изменению скорости вращения и тока статора ОАД соответственно. На рис. 5, *a* представлен график скорости электродвигателя. На графике видно, что циклическое изменение частоты приводит к циклическому изменению скорости, что позволяет оценить время протекания процесса нагружения. На рис. 5, *б* представлен график изменения тока статора. При изменении ча-

стоты напряжения циклический ток статора также изменяется. Для получения среднего значения тока на участке в Simulinc проводилось интегрирование по времени. Из результатов интегрирования, представленных на рис. 5, в, можно сделать вывод, что среднее значение полученного тока практически совпадает с номинальным значением, указанным в паспортных данных, тем самым результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности получения НТ [10] с использованием метода ИН.

Из проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Математическое моделирование процессов в асинхронном электродвигателе позволяет решить некоторые задачи, решение которых могло быть затруднительным при проведении реальных экспериментов. На практике проведение исследования с интегрированием мгновенных значений является затруднительным, но применение полученных результатов в процессе испытания ОАД после ремонта является оправданным.

2. Испытания однофазных асинхронных электродвигателей методом искусственного нагружения позволяют получить режим, эквивалентный нагрузочному. Обмотки статора в таком режиме проходят проверку под номинальным током. В настоящее время процесс испытаний является упрощенным и не позволяет оценить степень конструктивной надежности машины, так как режимы проверки не соответствуют реальным эксплуатационным режимам. Данный способ позволит получить более широкую картину технического состояния и позволит оценить работу машины в составе электропривода.

3. Данный метод позволяет добиться совершенствования испытательного оборудования, что выражается в существенном снижении массогабаритных характеристик путём исключения механических соединений между нагрузкой и испытуемым электродвигателем. Получение процесса искусственного нагружения с циклическим изменением параметров электродвигателя в настоящее время является возможным с применением высокоточных микропроцессорных устройств в схеме управления и применением силовых тиристорных ключей в силовой цепи испытательного стенда.

4. Актуальным в настоящее время является процесс отдачи электроэнергии в сеть. Процесс искусственного нагружения сопровождается режимом генераторного торможения, что предполагает возврат энергии. Однако для бытовых приборов и вспомогательных электроприводов на судах в основном используются асинхронные двигатели малой мощности, в связи с чем процесс отдачи электроэнергии в сеть может оказаться оправданным только при совместном проведении испытаний ОАД и АТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henao, G. A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti // *Industrial Electronics Magazine*. — 2014. — Vol. 8. — № 2. — Pp. 31–42.
2. Бейерлейн Е. В. Испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки / Е. В. Бейерлейн, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // *Известия Томского политехнического университета*. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 153–156.
3. Федоров М. М. К вопросу построения систем диагностики неисправностей асинхронных электродвигателей / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // *Электротехника и электромеханика*. — 2006. — № 2. — С. 59–61.
4. Хомутов С. О. Повышение надежности работы асинхронных двигателей путем разработки методики и технических средств для определения эталонных значений диагностического параметра их изоляции / С. О. Хомутов // *Ползуновский вестник*. — 2002. — № 1. — С. 26–32.
5. Марченко А. А. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 6. — С. 125.

6. Teaching of simulation an adjustable speed drive of induction motor using MatLab/Simulink in advanced electrical machine laboratory / A. Saghaforia, H. W. Ping, M. N. Uddin, A. Amindoust // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. — 2013. — Vol. 103. — Pp. 912–921. DOI:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

7. Воронцов А. Г. Моделирование машин возвратно-поступательного действия на пакете MatLab / А. Г. Воронцов, И. В. Дегтяренко // Компьютерные и информационные технологии в инженерной и управленческой деятельности. — 2000. — № 2. — С. 39–44.

8. Марченко А. А. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Фундаментальные исследования*. — 2013. — № 1–2. — С. 408–412.

9. Марченко А. А. Энергоэффективное нагружение асинхронных электродвигателей в процессе послеремонтных испытаний / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 6 (28). — С. 76–83.

10. Марченко А. А. Исследование модели асинхронного электродвигателя на возможность нагружения при помощи понижения частоты питающего напряжения / А. А. Марченко, О. А. Онищенко, С. Ю. Труднев // *Вестник КамчатГТУ*. — 2014. — № 29. — С. 17–24.

MODELING OF ARTIFICIAL LOADING PROCESSING OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

In the article presents the rationale, proposed by the authors, the method of artificial loading of single-phase induction motors after repair.

The main purpose of the article is to conduct research on the functioning of the windings of electric machines under the rated current. When using the method of artificial load is possible to obtain mode, the equivalent load mod. An equivalent motor stator current in this mode will be commensurate with the nominal current. To confirm the submission, the author presents the results of a method of modeling the process of artificial loading of single-phase induction motor. The main objectives of the study are the definition of the parameters of the equivalent circuit of the electric motor, and obtaining optimal parameters of the artificial load. The results of the implementation of tasks set by the authors is the model of a single-phase induction motor, the main parameters of which coincide with the nominal, and graphics-equivalent current.

Keywords: induction motor, dynamic loading, the mode of opposition, electricity, mechanical power, switching, network frequency.

REFERENCES

1. Henao, H., G. A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, and F. Filippetti. “Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques.” *Industrial Electronics Magazine* 8.2 (2014): 31–42.

2. Bejerlejn, E. V., O. L. Rapoport, and A. B. Cukublin. “Ispytaniya asinhronnyh mashin metodom vzaimnoj nagruzki.” *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 308.7 (2005): 153–156.

3. Fedorov, M. M., and A. A. Tkachenko. “On the problem of fault monitoring system designing for induction motors.” *Electrical Engineering & Electromechanics* 2 (2006): 59–61.

4. Homutov, S. O. “Povyshenie nadezhnosti raboty asinhronnyh dvigatelej putem razrabotki metodiki i tehnikeskikh sredstv dlja opredeleniya jetalonnyh znachenij diagnosticheskogo parametra ih izoljatsii.” *Polzunovskiy vestnik* 1 (2002): 26–32.

5. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. “Modeling of dinamic loading of the asynchronous electric motor.” *Modern problems of science and education* 6 (2012): 125.

6. Saghaforia, A., H. W. Ping, M. N. Uddin, and A. Amindoust. “Teaching of simulation an adjustable speed drive of induction motor using MATLAB/Simulink in advanced electrical machine laboratory.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 103 (2013): 912–921. DOI:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

7. Voroncov, A. G., and I. V. Degtjarenko. “Modelirovanie mashin vozvratno-postupatel'nogo dejstvija na pakete Matlab.” *Kompjuternye i informacionnye tehnologii v inzhenernoj i upravlencheskoj dejatel'nosti* 2 (2000): 39–44.

8. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. “Research of dinamic loading of the asynchronous electric motor.” *Fundamental research* 1-2 (2013): 408–412.

9. Marchenko, A. A., and N. N. Portnyagin. "Power effective loading of asynchronous electric motors in the course of postrepair tests." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 76–83.

10. Marchenko, A. A., O. A. Onishchenko, and S. Yu. Trudnev. "Research of asynchronous electric motor model on loading possibility by means of underfrequency of feeding voltage." *Vestnik KamchatGTU* 29 (2014): 17–24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марченко Алексей Александрович —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
Marchello21@mail.ru
Родимов Николай Владимирович — аспирант.
Научный руководитель:
Сивоконь Владимир Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
NRLoki514@gmail.com
Труднев Сергей Юрьевич —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»
trudnev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marchenko Aleksey Aleksandrovich —
Senior Lecturer.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
Marchello21@mail.ru
Rodimov Nikolaj Vladimirovich — Postgraduate.
Supervisor:
Sivokon Vladimir Pavlovich —
Dr. of Technical science, professor.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
NRLoki514@gmail.com
Trudnev Sergej Jurievich —
Senior Lecturer.
FSFEI IHPE "KamchatSTU"
trudnev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2015 г.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 004.056.53: 004.4

Л. А. Глущенко,
А. П. Нырков,
Д. В. Швед

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВА РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ МИКРОФОНОМ

В статье на основании проведенных экспериментальных исследований показана возможность использования корреляционного подхода к определению качества речевой информации, зарегистрированной по лазерному акустическому каналу при проведении закрытых совещаний на объектах защиты органов управления транспортом. На эксперименте реализован гетеродинный режим функционирования «лазерного микрофона». Гетеродинный режим позволяет получить речевую информацию на основе частотной модуляции лазерного излучения, и режим прямого фотодетектирования. Эти режимы позволяют получить речевую информацию на основе амплитудной модуляции лазерного излучения. Экспериментально подтверждена возможность применения корреляционного подхода для определения словесной разборчивости речи применительно к каналам, в которых присутствуют мультипликативные шумы. Ранее применение корреляционного подхода ограничивалось только каналами с аддитивными шумами. Ограничением для применения рассмотренного подхода к определению словесной разборчивости речи в лазерном акустическом канале может считаться необходимость цифровой обработки сигнала.

Ключевые слова: акустический сигнал, лазерный микрофон, словесная разборчивость речи, корреляционный подход, модуляция лазерного излучения, информационный канал.

ОДНИМ из источников информации ограниченного доступа являются помещения (служебные кабинеты, конференцзалы и др.), где проводится обсуждение вопросов с использованием информации ограниченного доступа как содержащей, так и не содержащей сведений, составляющих государственную тайну. Наибольшую угрозу утечки акустической информации представляет лазерный канал утечки речевой информации, который образуется при облучении лазерным лучом оконных стекол, зеркал, осветительных приборов и т. д.) [1] – [4].

В связи с этим актуальным остается решение задачи по определению качества зарегистрированной информации. Перехват конфиденциальной акустической информации системами лазерного и СВЧ подслушивания основан на модуляции отраженных лазерных или СВЧ излучений колеблющимся стеклом или другой тонкой перегородкой [1]. Различают три вида модуляции излучений, которые можно использовать для извлечения акустической речевой информации из отраженного излучения:

- частотная модуляция, вызванная эффектом Доплера, вследствие вибрации оконного стекла или тонкой перегородки под воздействием звуковых волн, источниками которых являются люди или работающая техника внутри контролируемого помещения;
- фазовая модуляция, связанная с наличием в отраженном сигнале дифракционных компонентов;
- амплитудная модуляция, вызванная колебаниями подсвечивающего лазерного пучка относительно направления максимального, зеркального отражения. Колебания вызваны перемещением оконного стекла под воздействием акустического сигнала. Это связано с тем, что амплитуды колебаний стекла слишком малы — от нескольких нанометров до нескольких сотен нанометров в зависимости от интенсивности и частоты акустического сигнала.

Эффективность η функционирования информационного канала принято измерять в виде отношения

$$\eta = \frac{J_0}{J_1}, \quad (1)$$

где J_0 — количество информации, поступающей от передающего источника; J_1 — количество информации, полученной на выходе приемного устройства.

В таком виде, основанном на строгой теории информации, оценка качества информационного канала проводится редко. В частности, для каналов, передающих речевую информацию, часто используют понятие *разборчивости* (понятности) речи. Следует отметить, что разборчивость речи является важнейшим параметром, характеризующим как каналы передачи, так и каналы утечки речевой информации, поэтому методы расчета и измерения непрерывно развиваются. Измерения разборчивости речи можно производить как с участием дикторов и аудиторов (*субъективные* методы измерений), так и без их участия (*объективные* методы измерения) [5]. Очевидный недостаток «чисто» субъективных подходов — неизбежное влияние на результаты измерений особенностей речи и слуха людей, участвующих в испытаниях. Для устранения этого недостатка применяют «объективизированные» методы. Наиболее распространенным среди них является *метод артикуляционных исследований*, заключающийся в определении разборчивости речи, полученной по конкретному информационному каналу с помощью оптико-акустической аппаратуры [6] – [7]. Для этого Н. Б. Покровский предлагает использовать специально подобранный набор тестовых сигналов [7].

Разборчивость передаваемой речи измеряется в процентах или долях единицы величиной W по зависимости

$$W = \frac{N_0}{N_1}, \quad (2)$$

где N_0 — число правильно принятых по испытываемому каналу элементов речи; N_1 — их общее количество. N_1 должно быть достаточно большим для статистической достоверности.

В зависимости от полученной величины W обеспечивается определенное качество акустической речевой информации. В таблице [8] приводятся данные, полученные по результатам сопоставления качества информации и величины словесной разборчивости речи.

Качество акустической речевой информации

Величина W	Качество информации
1 – 0,8	Обеспечивается составление подробной справки (доклада) о содержании переговоров
0,6 – 0,7	Подробный отчет о содержании зарегистрированной информации невозможен
0,4 – 0,5	По перехваченному речевому сообщению можно составить краткий отчет, отражающий предмет, проблему и общий смысл зарегистрированного разговора, отдельные слова не воспринимаются
0,2 – 0,3	Перехваченное сообщение содержит отдельные правильно понятые слова, позволяющие установить предмет разговора
Менее 0,2	Анализ перехваченного сообщения позволяет определить только факт наличия речи, проведения переговоров, при этом голос говорящего не идентифицируется, тема разговора не определяется

Объективизация в методе артикуляции достигается за счет усреднения результатов измерений, поскольку в измерениях разборчивости участвуют специально подобранные брига-

ды (артикуляционные бригады). Интуитивно ясно, что словесная разборчивость речи, применяющаяся к конкретным каналам, а именно — акустическим, близка по смыслу к абстрактной теоретической величине η . Следует отметить, что W — величина эмпирическая, носящая статистический характер. Теоретический анализ речевых каналов на основе исследования словесной разборчивости речи по этой причине представляет сложную научно-техническую проблему.

Поскольку артикуляционный метод непосредственно реализуется артикуляционными бригадами и для объективизации требуется большой объем измерений, процесс этот сложный и трудоемкий. Это не позволяет реализовать автоматизацию измерений и провести теоретический анализ канала. Применение на практике артикуляционного метода чрезвычайно неудобно из-за серьезных временных и материальных затрат. Артикуляционные испытания должны проводиться опытной бригадой исследователей, сопровождаться соответствующим набором статистических данных и обработкой результатов по определенной процедуре. Значимость артикуляционного метода заключается в установленных основных зависимостях для получения аналитической модели оценки разборчивости речи [6]. Однако этот подход не годится для автоматизации процесса определения словесной разборчивости речи. Для решения проблемы автоматизации этого процесса необходима разработка надежной математической модели.

Известно, что ухо, как измерительный прибор, реагирует только на первые два момента воздействующего случайного процесса. Именно поэтому был предложен корреляционный подход к теории разборчивости речи [9]. Корреляционный подход основан на следующих предположениях:

- разборчивость как качество образует норму в функциональном пространстве реализаций финитных непрерывных речевых сообщений $S(t)$ длительностью T ;
- существует реализация речевого сообщения $S_0(t)$, имеющая максимальную относительную разборчивость $A(S_0) = 1$;
- любое преобразование реализации $S_0(t)$ только уменьшает разборчивость;
- существует класс преобразований речевых сообщений $\{G\}$, не изменяющих разборчивость речи (класс инвариантов), например — задержка по времени τ и связанные с ней фазовые изменения в спектре речи, а также изменения масштаба речевого сообщения C в определенных пределах (до появления ограничения);
- разборчивость реализации речевого сообщения является монотонно невозрастающей функцией среднеквадратического отклонения реализации выходного речевого сигнала от входного ε^2 .

Для связи реализаций речевого сигнала на входе (A_0) и на выходе канала ($A(S(t))$) в работе [9] предлагается использовать функцию

$$A(S(t)) = \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_{\max}^2} \right) A_0, \quad (3)$$

где $\varepsilon^2 = \min \langle (S(t) - S_0(t))^2 \rangle$ — среднеквадратическое отклонение реализации сигнала на выходе канала; $\langle \dots \rangle$ — означает статистическое усреднение.

Для оговоренного класса преобразований $\{G\}$ можно записать

$$\varepsilon^2 = \min_{C, \tau} \langle (C\varphi(t - \tau) - S_0(t))^2 \rangle, \quad (4)$$

где $C\varphi(t)$ — речевое сообщение, преобразованное в результате передачи по каналу; C — масштабный коэффициент; τ — задержка по времени; $\varepsilon_{\max}^2 = P_s = \langle S_0(t)^2 \rangle$.

Исходя из (3), можно записать

$$A_\varphi = M_n(B_s) R_{S, \varphi}^2(0), \quad (5)$$

где $R_{S,\varphi}$ — коэффициент корреляции между переданным и принятым речевыми сигналами;

$R_{S,\varphi}^2(\tau) = \frac{\langle S_0(t)\varphi(t) \rangle}{P_S P_\varphi}$; $P_S = \langle S_0(t)^2 \rangle$ — мощность передаваемого сигнала; $P_\varphi = \langle \varphi(t)^2 \rangle$ — мощность сигнала на выходе канала; $M_n(B_s)$ — коэффициент, зависящий от изменения условий восприятия речи,

$$M_n(B_s) = 1 - \exp\left[-\frac{225}{B_s}\right]. \quad (6)$$

Сущность корреляционного подхода заключается в том, что коэффициент взаимной корреляции в виде (5) определяет словесную разборчивость речи.

В работе [10] на основе экспериментальных исследований акустических речевых сигналов получено эмпирическое соотношение для словесной разборчивости речи

$$W = \begin{cases} 1,54K_p^{0,25}[1 - \exp(-11K_p)], & K_p < 0,15 \\ 1 - \exp\left(-\frac{11K_p}{1+0,7K_p}\right), & K_p \geq 0,15 \end{cases}, \quad (7)$$

где K_p — коэффициент разборчивости речи. Показано, что для акустического канала, в условиях действия некоррелированного с речевым сообщением шума в качестве коэффициента разборчивости речи можно принять $K_p = A_\varphi$.

В настоящей работе на основе выполненных экспериментальных исследований показано, что корреляционный подход применим к более широкому классу преобразований и при наличии мультипликативных шумов. Рассматривался лазерный микрофон. Следует отметить, что в оптико-акустическом канале действует несколько различных по физической природе шумов. Это акустические шумы, оптические шумы и шумы электронного тракта. Преобразование сигнала не сводится к масштабированию и сдвигу. Воздействие — более сложное функционально. Акустический сигнал возбуждает структурные волны в ограждающих конструкциях, которые, в свою очередь, приводят к модуляции (амплитудной, фазовой или частотной) оптического сигнала. Отдельно следует отметить тот факт, что на оптический сигнал действует полезный виброакустический сигнал вместе с виброакустическим шумом, т. е. оптический сигнал модулируется смесью сигнала с шумом, таким образом, в канале присутствуют мультипликативные шумы. Обобщение соотношения (7) на лазерный акустический канал представляется весьма важным, так как показывает возможность использования корреляционного подхода для разных физических каналов.

Следует отметить, что лазерный акустический канал приводит к спектральному искажению сигнала. Однако современные цифровые методы обработки и шумоочистки сигналов позволяют минимизировать эти искажения. Это было показано при проведении экспериментальных исследований. Использовались различные, в основном полосовые, цифровые фильтры, а также фильтры, построенные на основе вейвлет-анализа [11] – [14].

В ходе выполнения экспериментальных исследований были реализованы две схемы построения «лазерных микрофонов»:

- режим гетеродинного приема (частотная модуляция) (рис. 1);
- режим прямого фотодетектирования (рис. 2).

Гетеродинный метод

«Лазерный микрофон», работающий в режиме гетеродинного приема, был реализован на базе лазерного виброметра LV-2, работающего в режиме гетеродинного приема, при мощности зондирующего сигнала 20 мВт ($\lambda = 0,78$ мкм) (изготовитель ООО «Лазерная техника», г. Новосибирск [15]). На рис. 1 приведена структурная схема экспериментальной установки, работающей в режиме гетеродинного приема.

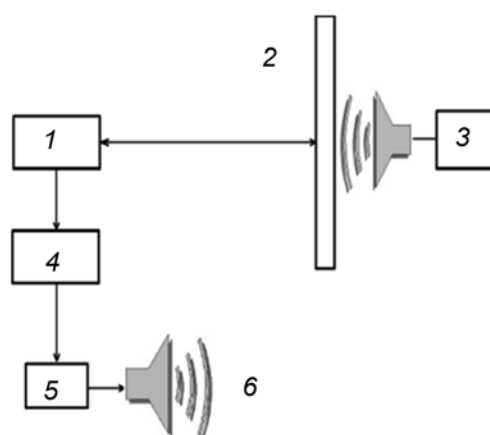


Рис. 1. Структурная схема установки, работающей в режиме гетеродинного приема:
1 — приемопередающее устройство LV-2; 2 — оконное стекло; 3 — источник речевого сигнала;
4 — электронный блок регистрации и обработки речевой информации на базе ПК;
5 — программное обеспечение «Power Graph»; 6 — акустическая приставка к ПК

Метод прямого фотодетектирования

На рис. 2 приведена структурная схема установки, работающей в режиме прямого фотодетектирования. Установка создана на базе твердотельного лазерного модуля с диодной накачкой, модель LCM-T-112 с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм и мощностью 100 мВт, и фотоприемного устройства (ФПУ), созданного в ОАО «НИИ ОЭП» на базе $p-i-n$ -фотодиода ФДУК-12С, сопряженного с АЦП E14-440 (фирмы *L-card*).

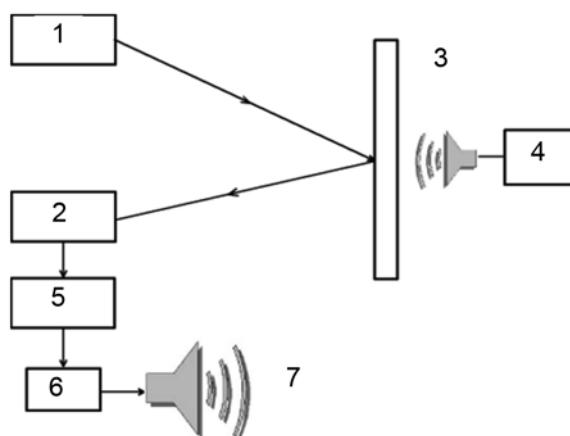


Рис. 2. Структурная схема установки, работающей в режиме прямого фотодетектирования:
1 — лазерный излучатель; 2 — фотоприемное устройство;
3 — оконное стекло; 4 — источник речевого сигнала;
5 — электронный блок регистрации и обработки речевой информации на базе ПК;
6 — программное обеспечение «Power Graph»; 7 — акустическая приставка к ПК

В обоих случаях осуществлялся ввод входного и выходного сигнала через многоканальный АЦП в ПК, где проводилась обработка в программном пакете Power Graph, который представляет собой сигнальный редактор (рис. 3, 4).

Источник речевого сигнала — акустическая приставка к ПК, выдающая «ГОСТированный» речевой тест (записанный в цифровом виде). Для измерения уровня речевого сигнала и шума служил комплекс «Спрут 6», являющийся сертифицированным программно-аппаратным средством.

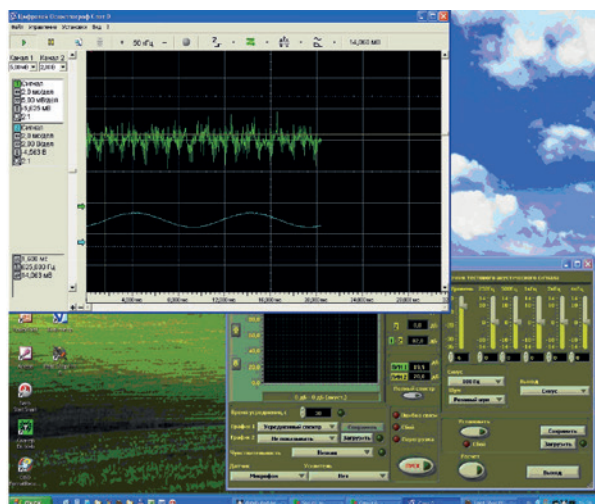


Рис. 3. Осциллограмма тестового сигнала вибродатчика, частота 100 Гц

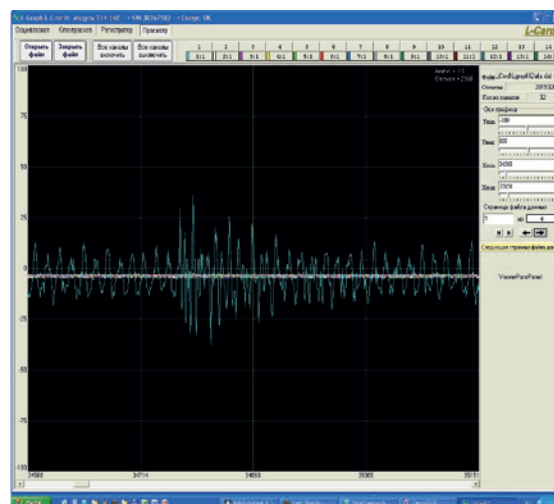


Рис. 4. Осциллограмма вибраций стекла, вызванных акустическим речевым сигналом, записанная по лазерному каналу

На рис. 5, 6 показаны примеры регистрации входного (тестового речевого) и выходного сигналов. Статистические характеристики сигналов вычислялись с помощью программы Power Graph. На рис. 7 показана корреляционная функция входного и выходного сигналов. При проведении измерений расстояние от источника лазерного излучения на базе вибromетра LV-2 (длина волны излучения $\lambda = 0,78$ мкм, мощность 20 мВт) до оконного стекла составляло 5 м.

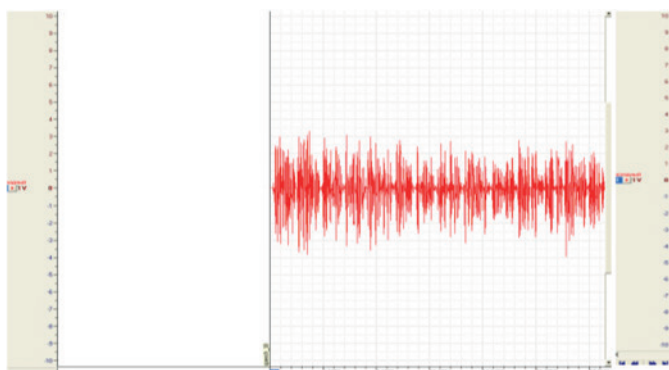


Рис. 5. Осциллограмма тестового речевого сигнала (исходного)

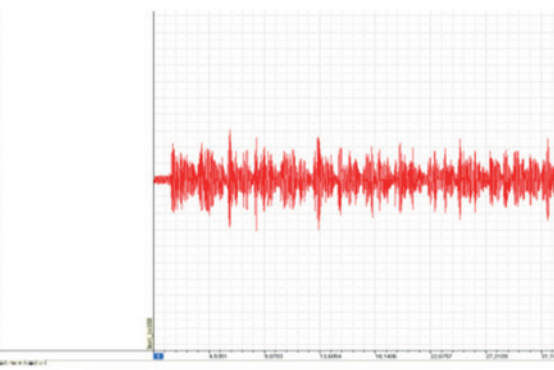


Рис. 6. Осциллограмма выходного сигнала

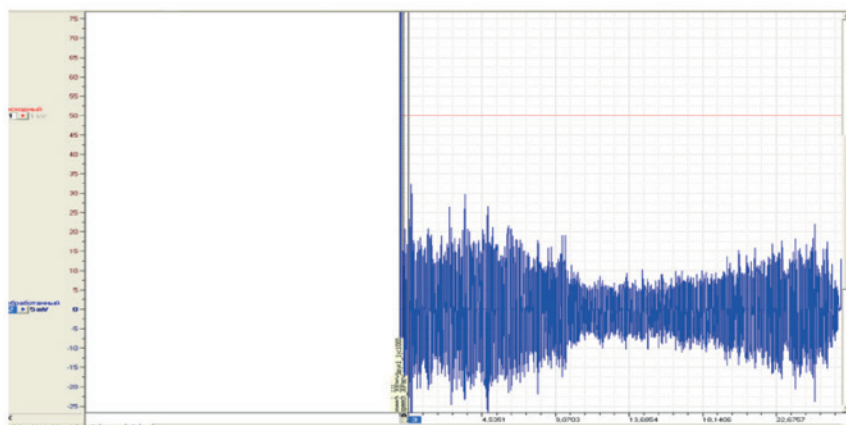


Рис. 7. Корреляционная функция сигналов

Оценки словесной разборчивости речи, полученные после обработки на основе соотношений (5) – (7), хорошо согласуются с данными табл. 1 и совпадают с точностью до 30 % с результатами, полученными по методике [16], [17]. Следует отметить, что хорошего согласия с оценками, выполненными по методике [16], удавалось добиться лишь в случае, если уровень входного и выходного сигналов составлял 80 дБ. Ограничение это не представляется существенным, так как в установке с цифровой обработкой легко можно добиться необходимого уровня сигналов.

Таким образом, выполненные экспериментальные измерения по определению словесной разборчивости речи, зарегистрированной лазерным микрофоном, позволяют сделать вывод о возможности использования корреляционного подхода для определения словесной разборчивости речи. Экспериментально подтверждена возможность применения корреляционного подхода для определения словесной разборчивости речи для лазерного акустического канала, т. е. для более широкого класса преобразований сигнала, чем было установлено в [8] и в присутствии мультипликативных шумов. Ограничением в применении корреляционного подхода к лазерному каналу следует считать необходимость выполнения цифровой обработки сигнала.

Предлагаемый подход к определению качества речевой информации, зарегистрированной по лазерному акустическому каналу, позволит специалистам подразделений по защите информации в органах управления транспортом более качественно осуществлять оценку возможности средств разведки по оптико-электронному (лазерному) каналу утечки акустической информации при разработке «Руководства по защите информации в организации», а также формировать перечень актуальных угроз информационной безопасности [18], [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение качества лазерного канала утечки речевой информации / А. Глущенко, Л. Глущенко, А. Корзун, А. Казановский // Фотоника. — 2011. — Т. 25. — № 1. — С. 24–27.
2. Большая энциклопедия промышленного шпионажа / Ю. Ф. Каторин, Е. В. Куренков, А. В. Лысов, А. Н. Остапенко. — СПб.: Полигон, 2000. — 896 с.
3. Katorin Yu. F. Assessment of possibilities directional microphones for interception of audio signal / Y. F. Katorin, V. V. Tarnavskiy // Vestnik policii. — 2015. — № 1 (3). — С. 28–33. DOI: 10.13187/VesP.2015.3.28.
4. Каторин Ю. Ф. Техническая защита информации: поиск закладных устройств в помещениях / Ю. Ф. Каторин, А. Е. Монахов, А. П. Ныров. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 279 с.
5. Дидковский В. С. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации / В. С. Дидковский, М. В. Дидковская, А. Н. Продеус. — Киев: Имекс-ЛТД, 2008. — 420 с.
6. Железняк В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам: учеб. пособие / В. К. Железняк. — СПб.: ГУАП, 2006. — 188 с.
7. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи / Н. Б. Покровский. — М.: Радио и связь, 1962. — 392 с.
8. Новые каналы утечки конфиденциальной речевой информации через волоконно-оптические подсистемы СКС / В. В. Гришачев, Д. Б. Халяпин, Н. А. Шевченко, В. Г. Мерзликин // Специальная техника. — 2009. — № 2. — С. 2–9.
9. Железняк В. К. Корреляционная теория разборчивости речи / В. К. Железняк, А. А. Колесников, В. Ф. Комарович // Вопросы радиоэлектроники. — 1995. — № 2. — С. 3–7.
10. Хорев А. А. Оценка эффективности методов защиты речевой информации. Общесистемные вопросы защиты информации: монография. Кн. 1 / А. А. Хорев, В. К. Железняк, Ю. К. Макаров. — М.: Радио-техника, 2003. — 296 с.
11. Способы повышения качества информации в лазерных телекоммуникационных системах / Ф. А. Запругаев, Л. А. Глущенко, П. П. Иванов, Д. В. Круглова // Сборник трудов 21-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». — 2011. — Т. 3. — С. 60–72.
12. Горшков Ю. Г. Новые решения речевых технологий безопасности / Ю. Г. Горшков // Специальная техника. — 2006. — № 4. — С. 41–48.

13. Халяпин Д. Б. Коктейль из звуков. Использование динамических спектрограмм для оценки качества зашумления речевого сигнала / Д. Б. Халяпин, А. А. Рюмин // Информационная безопасность. — 2005. — № 4. — С. 28–29.
14. Дворянкин С. В. Цифровая обработка изображений динамических спектрограмм аудиосигналов в задачах обеспечения безопасности речевой связи / С. В. Дворянкин // Специальная техника. — 2000. — № 3. — С. 37–45.
15. LV-2 лазерный вибропреобразователь. Техническое описание. Новосибирск: ООО «ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://lasertechnics.org> (дата обращения: 29.07.2015).
16. Глущенко А. В. Математическая модель получения информации об акустическом речевом сигнале по отраженному лазерному излучению / А. В. Глущенко, Л. А. Глущенко, В. И. Тупота // Сборник докладов 20-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация-2010». — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — Т. 1. — С. 209–220.
17. Оценка эффективности получения информации об акустическом сигнале по отраженному лазерному излучению / А. В. Глущенко, Л. А. Глущенко, А. М. Корзун, В. И. Тупота // Сборник трудов IX Международной конференции «Прикладная оптика-2010». — СПб., 2010. — С. 71–75.
18. Каторин Ю. Ф. Защищенность информации в каналах передачи данных в береговых сетях автоматизированной идентификационной системы / Ю. Ф. Каторин, В. В. Коротков, А. П. Нырков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 98–102.
19. Нырков А. П. Методика аудита объектов информатизации по требованиям информационной безопасности / А. П. Нырков, С. А. Рудакова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 146–149.

THE USE OF THE CORRELATIVE APPROACH FOR DETERMINING THE VOICE QUALITY OF INFORMATION WHICH WAS REGISTERED BY THE «LASER MICROPHONE»

In this article the possibility of using the correlative approach for defining the quality of the voice information which were recorded by the laser acoustic channel during private meetings were shown on the basis of experimental studies. The heterodyne regime of functioning of the «laser microphone» was implemented by experiment. Heterodyne regime allows to receive the voice information based on the frequency modulation of the laser radiation and the direct photodetection regime. These regimes help to receive the voice information based on the amplitude modulation of the laser radiation. The possibility of applying the correlative approach for determining the verbal speech with reference to the channels with the multiplicative noises was confirmed by experiment. Previously, the use of the correlative approach was possible only for channels with additive noise. The necessity of the digital signal processing may be considered as a restriction for using this method of determining the verbal speech in the laser acoustic channel.

Key words: acoustic signal, laser microphone, verbal intelligibility, correlative approach, modulation of a laser radiation, informational channel.

REFERENCES

1. Glushhenko, A., L. Glushhenko, A. Korzun, and A. Kazanovskij. "Laser Channel Voice Data leakage Quality Determination." *Photonika* 1.25 (2011): 24–27.
2. Katorin, Ju. F., E. V. Kurenkov, A. V. Lysov, and A. N. Ostapenko. *Bolshaja jenciklopedija promyshlennogo shpionazha*. SPb.: ООО «Izd-vo Poligon», 2000.
3. Katorin, Yu. F., and V. V. Tarnavskij. "Assessment of possibilities directional microphones for interception of audio signal." *Vestnik policii* 1(3) (2015): 28–33. DOI: 10.13187/VesP.2015.3.28.
4. Katorin, Ju. F., A. E. Monahov, and A. P. Nyrkov. *Tekhnicheskaja zashhita informacii: poisk zakladnyh ustroystv v pomeshhenijah*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.
5. Didkovskij, V. S., M. V. Didkovskaja, and A. N. Prodeus. *Akusticheskaja jekspertiza kanalov rechevoj kommunikacii*. Kiev, 2008.

6. Zheleznyak, V. K. *Zashhita informacii ot utechki po tehničeskim kanalām: uchebnoe posobie*. SPb.: GUAP, 2006.
7. Pokrovskij, N. B. *Raschet i izmerenie razborchivosti rechi*. M.: Radio i svjaz, 1962.
8. Grishachev, V. V., D. B. Haljapin, N. A. Shevchenko, and V. G. Merzlikin. "Novye kanaly utechki konfidencialnoj rechevoj informacii cherez volokonno-optičeskie podsistemy SKS." *Specialnaja tehnika* 2 (2009): 2–9.
9. Zheleznyak, V. K., A. A. Kolesnikov, and V. F. Komarovich. "Korreljacionnaja teorija razborchivosti rechi." *Voprosy radioelektroniki* 2 (1995): 3–7.
10. Horev, A. A., V. K. Zheleznyak, and Ju. K. Makarov. *Ocenka jeffektivnosti metodov zashhity rechevoj informacii. Obshhesistemnye voprosy zashhity informacii: monografija. Kn.1*. M.: Radiotekhnika, 2003.
11. Zaprjagaev, F. A., L. A. Glushhenko, P. P. Ivanov, and D. V. Kruglova. "Sposoby povyshenija kachestva informacii v lazernyh telekommunikacionnyh sistemah." *Sb. tr. 21 mezhdunarodnoj konferencii «Lazery. Izmerenija. Informacija»*. Tom 3. SPb., 2011: 60–72.
12. Gorshkov, Ju. G. "Novye reshenija rechevyh tehnologij bezopasnosti." *Specialnaja tehnika* 4 (2006): 41–48.
13. Haljapin, D. B., and A. A. Rjumin. "Koktejl iz zvukov. Ispolzovanie dinamicheskikh spektrogramm dlja ocenki kachestva zashumlenija rechevogo signala." *Information Security* 4 (2005): 28–29.
14. Dvorjankin, S. V. "Cifrovaja obrabotka izobrazhenij dinamicheskikh spektrogramm audiosignalov v zadachah obespechenija bezopasnosti rechevoj svyazi." *Specialnaja tehnika* 3 (2000): 37–45.
15. LV-2 lazernyj vibropreobrazovatel. Tehničeskoe opisanie. Novosibirsk: OOO «LAZERNAJA TEHNIKA». Web. 29 July 2015 <<http://lasertechnics.org>>.
16. Glushhenko, A. V., L. A. Glushhenko, and V. I. Tupota. "Matematicheskaja model poluchenija informacii ob akustičeskom rechevom signale po otrazhennomu lazernomu izlucheniju." *Sb. dokladov 20-j mezhdunarodnoj konferencii «Lazery. Izmerenija. Informacija-2010»*. Tom 1. SPb.: Izd-vo Politehn. un–ta, 2010: 209–220.
17. Glushhenko, A. V., L. A. Glushhenko, A. M. Korzun, and V. I. Tupota. "Ocenka jeffektivnosti poluchenija informacii ob akustičeskom signale po otrazhennomu lazernomu izlucheniju." *Sb. tr. IX Mezhdunarodnoj konferencii «Prikladnaja optika-2010»*. SPb., 2010: 71–75.
18. Katorin, Ju. F., V. V. Korotkov, and A. P. Nyrkov. "Information security in the channels of data transmission on the waterside networks of automatic identification system." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2012): 98–102.
19. Nyrkov, A. P., and S. A. Rudakova. "The technique of audit of information objects for information security requirements." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 3 (2012): 146–149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глуценко Лариса Александровна —
кандидат физико-математических наук.
ОАО «НИИ ОЭП»
laglushenko@rambler.ru
Ныркoв Анатолий Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com
Швед Дарья Викторовна —
лаборант.
НИУ ИТМО
dasha@cit.ifmo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Glushchenko Larisa Alexandrovna -
PhD.
"NII OEP" PLC
laglushenko@rambler.ru
Nyrkov Anatolij Pavlovich -
Dr. of Technical science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping,
kaf.koib@gmail.com
Shved Daria Viktorovna -
laboratory technician.
ITMO UNIVERSITY
dasha@cit.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2015

РЕКУРСИВНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПУТЕЙ СРЕДСТВАМИ MATLAB

Методы и средства оптимизации логистических систем и их элементов в условиях развития институтов рынка играют определяющую роль в создании новых механизмов повышения эффективности и качества функционирования объектов водного транспорта и транспортной инфраструктуры в целом. Современная теория и численные методы оптимизации являются инструментом, позволяющим принимать научно обоснованные решения при управлении технологическими системами и транспортными средствами с использованием моделей и компьютерных технологий, быстро и с малыми затратами ресурсов и времени адаптироваться при изменениях объемов и конъюнктуры рынка в соответствующих секторах предоставления транспортных услуг. В работе рассматривается рекурсивный метод оптимизации трафика логистических систем с использованием компьютерных технологий, реализованных средствами MatLab с целью повышения уровня и организации управления транспортно-логистическими системами с коррекцией по состоянию. Рекурсивный метод, в отличие от существующих решений, позволяет автоматизировать выбор кратчайшего пути доставки грузов в транспортной сети со сложной топологией, осуществляемый на основе взвешенного графа, с учетом заданного критерия качества. В работе предложены алгоритм и рекурсивная процедура оптимизации для реализации метода и сокращения времени выполнения транспортной работы. Рассмотрен конкретный пример определения кратчайших путей для подтверждения корректности предложенных технических решений.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, логистика, ориентированный граф, критический путь, целевой функционал, модель, критерий качества.

РЫНОЧНЫЕ экономические условия требуют повышения эффективности функционирования всех субъектов хозяйственной деятельности, в том числе предприятий, работающих в области дистрибуции товаров и осуществляющих доставку заказов своим клиентам. Как показывают проводимые исследования, совокупные логистические издержки на доставку заказов составляют до 50 % от общей суммы затрат таких предприятий [1]. Одним из путей сокращения логистических затрат является формирование оптимальных транспортных маршрутов.

При оперативном управлении процессом доставки грузов важен показатель времени, минимизация которого связана с поиском маршрута, имеющего самую короткую длину из всех возможных. Причем, для удобства построения маршрутов перевозок необходимо предусмотреть возможность составления программой не одного, а нескольких маршрутов доставки на случай, если отдельные маршруты будут перегружены. Аналитические методы решения неприменимы к решению задачи оптимального формирования маршрутов в силу ее большой размерности и высокой вычислительной сложности. В то же время, математический аппарат динамической оптимизации, основанный на методологии пошаговой оптимизации, может быть использован при нахождении кратчайших расстояний, например, на географической карте, представленной в виде сети.

Решение задачи по определению кратчайших расстояний между пунктами отправления и пунктами получения продукции по существующей транспортной сети является исходным этапом при решении таких экономических задач как оптимальное закрепление потребителей за поставщиками, повышение производительности транспорта за счет сокращения непроизводительного пробега и др. [1] – [4]. Основной моделью большинства логистических схем доставки грузов является взвешенный граф (как ориентированный, так и неориентированный), с помощью которого определяется кратчайший путь как наиболее эффективный с точки зрения заданного критерия качества.

Теория графов началась с задачи про семь кенигсбергских мостов. Вопрос задачи звучит следующим образом: можно ли пройти по всем мостам города Кенигсберга и при этом вернуться в исходную точку так, чтобы по каждому мосту пройти только один раз. Знаменитый петербургский математик швейцарского происхождения Леонард Эйлер блестяще решил эту задачу при помощи теории графов.

В середине 1950-х гг. в теории графов сформировалась потоковая задача поиска искомого пути на сетке. Соответствующая методология получила название «Сетевое планирование и управление» (СПУ) [1], [5] – [6]. В терминологии теории графов взвешенным графом является конечный связный граф (как ориентированный, так и неориентированный) без контуров, в котором каждому его ребру присвоено некоторое число, называемое длиной ребра.

Наиболее эффективный алгоритм решения задачи о кратчайшем пути первоначально дал Дейкстра [5], [7] – [9]. Алгоритм голландского ученого Эдсгера Дейкстры находит все кратчайшие пути из одной изначально заданной вершины графа до всех остальных. С его помощью, при наличии всей необходимой информации, можно, например, узнать какую последовательность дорог лучше использовать, чтобы добраться из одного города до каждого из многих других, или в какие страны выгодней экспортировать нефть и т. п. Минусом данного метода является невозможность обработки графов, в которых имеются ребра с отрицательным весом, т. е. если, например, некая система предусматривает убыточные для фирмы маршруты, то для работы с ней следует воспользоваться отличным от алгоритма Дейкстры методом.

В общем случае этот метод основан на приписывании вершинам временных пометок, причем пометка вершины дает верхнюю границу длины пути от некоторой вершины s к рассматриваемой вершине. Эти пометки постепенно уменьшаются с помощью некоторой итерационной процедуры, и на каждом шаге итерации только одна из временных пометок становится постоянной. Последнее указывает на то, что пометка уже не является верхней границей, а дает точную длину кратчайшего пути от t к рассматриваемой вершине. Рассмотрим подробнее этот алгоритм.

Для программной реализации алгоритма понадобится два массива: логический L — для хранения текущей информации о пройденных вершинах и численный LP , в который будут заноситься найденные кратчайшие пути. Итак, имеется граф $G = (X, C)$ со взвешенными дугами, в котором $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество вершин, а C — матрица весов дуг (ребер). Каждая из вершин, входящих в множество X , изначально отмечена как непосещенная, т. е. элементам массива X присвоено значение *zero*.

Пусть $L(X)$ представляет собой вектор, координатами которого являются текущие расстояния $L(x_i)$ от стартовой вершины до каждой из вершин x_i . Поскольку самые выгодные пути только предстоит найти, в каждый элемент $L(x_i)$ вектора записывается такое число, которое заведомо больше любого потенциального пути. В качестве исходного пункта выбирается вершина s и ей приписывается нулевой путь $L(s) = 0$, так как нет ребра из s в s (метод не предусматривает петель). Далее находятся все соседние с s вершины, в которые входит ребро из s (пусть таковыми будут t и u) и поочередно вычисляются длины маршрута из s в каждую из них:

- $L(t) = L[s] + c(s, t)$ ребра;
- $L(u) = L[s] + c(s, u)$ ребра.

Однако вполне вероятно, что в ту или иную вершину из s существует несколько путей, поэтому цену пути в такую вершину в массиве $L(t)$ придется пересматривать, тогда наибольшее (неоптимальное) значение игнорируется, а наименьшее ставится в соответствие вершине.

После обработки смежных с s вершин она помечается как посещенная, и активной становится та вершина, путь из s в которую минимален. Допустим, путь из s в u короче, чем из s в t , следовательно, вершина u становится активной, и описанным образом исследуются ее соседи, за исключением вершины s . Далее, u помечается как пройденная, активной становится вершина t , и вся процедура повторяется для нее. Алгоритм продолжается до тех пор, пока все доступные из s вершины не будут исследованы.

Теперь на конкретном графе проследим работу алгоритма, найдем все кратчайшие пути между истоковой и всеми остальными вершинами. Размер (количество ребер) изображенного далее графа равен 5 ($|E| = 5$), а порядок (количество вершин) — 4 ($|V| = 4$). Это взвешенный граф, каждому из его ребер поставлено в соответствие некоторое числовое значение, поэтому ценность маршрута необязательно определяется числом ребер, лежащих между парой вершин.

Математическую модель сетевой задачи построим на примере сетевого графика (рис. 1), заданного в виде ориентированного графа, который состоит из 9 узлов (событий) и 13 дуг (операций). Дан граф $G = (X, A, C)$ с взвешенными дугами, пример которого показан на рис. 1. Обозначим $L(x_i)$ пометку вершины x_i . Веса дуг (или ребер) даны матрицей весов (табл. 1).

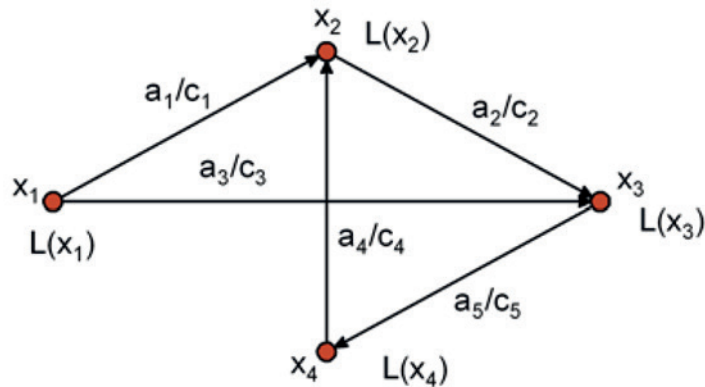


Рис. 1. Граф со взвешенными дугами

Таблица 1

Матрица весов расстояний

	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1		c_1	c_3	
x_2			c_2	
x_3				c_5
x_4		c_4		

Рассмотрим алгоритм нахождения кратчайшего пути от вершины s к вершине t графа и более общий случай: от вершины s ко всем вершинам графа.

Шаг 1. Присвоение начальных значений вершинам графа. Положить $L(s) = 0$ и считать эту пометку постоянной. Для всех вершин $x_i \neq s$ положить $L(x_i) = \infty$ и считать эти пометки временными. За текущую рассматриваемую вершину с постоянной пометкой взять вершину p , т. е. положить $p = s$.

Шаг 2. Обновление пометок. Для вершин, входящих в прямое отображение вершины p , т. е. для всех x_i , принадлежащих $\Gamma(p)$, пометки которых временные, изменить пометки в соответствии с выражением

$$L(x_i) \leftarrow \min[L(x_i), L(p) + c(p, x_i)]. \quad (1)$$

Шаг 3. Превращение временной пометки в постоянную. Среди всех вершин с временными пометками найти такую, для которой

$$L(x_i^*) = \min[L(x_i)]. \quad (2)$$

Считать пометку вершины x_i^* постоянной и положить $p = x_i^*$.

Шаг 4. Обновление пометок для новой отображаемой вершины. В качестве таковой принять вершину x_i^* , т. е. $p = x_i^*$, а $L(p)$ является длиной кратчайшего пути от s к x_i^* .

Шаг 5. Просмотр вершин графа на наличие у них постоянных пометок:

- если все вершины отмечены постоянными метками, эти метки дают длины кратчайших путей;
- если некоторые метки являются временными, следует перейти к шагу 2.

Как только длины кратчайших путей от вершины s будут найдены, сами пути можно получить с помощью рекурсивной процедуры. Так как вершина x_i^* непосредственно предшествует вершине x_i в кратчайшем пути от s к x_i , то для любой вершины x_i соответствующую вершину x_i^* можно найти как одну из оставшихся вершин, для которой

$$L(x_i^*) + c(x_i^*, x_i) = L(x_i). \quad (3)$$

Если кратчайший путь от s до любой вершины x_i является единственным, то дуги (x_i^*, x_i) этого кратчайшего пути образуют ориентированное дерево с корнем s . Если существует несколько кратчайших путей от s к какой-либо другой вершине, то при некоторой фиксированной вершине x_i^* соотношение (1) будет выполняться для более, чем одной вершины x_i . В этом случае, выбор может быть либо произвольным (если нужен какой-то один кратчайший путь между s и x_i), либо таким, что рассматриваются все дуги (x_i^*, x_i) , входящие в какой-либо из кратчайших путей. При этом совокупность всех таких дуг образует не ориентированное дерево, а общий граф, называемый базой относительно s [10] – [12].

Пример. Рассмотрим граф смешанного типа, изображенный на рис. 2, где каждое неориентированное ребро рассматривается как пара противоположно направленных дуг равного веса.

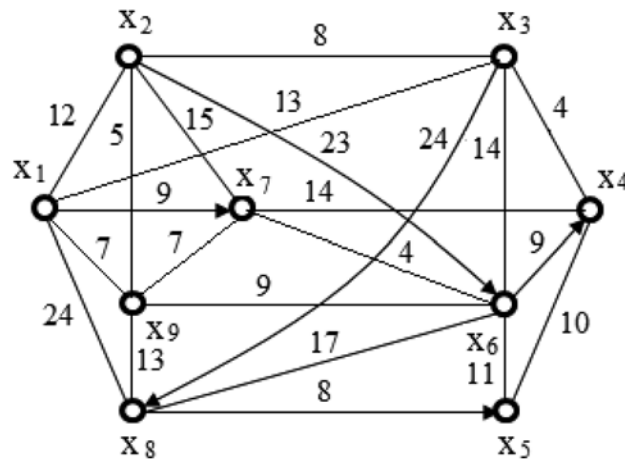


Рис. 2. Исходный взвешенный граф смешанного типа

Матрица весов приведена в табл. 2. Требуется найти все кратчайшие пути от вершины x_1 ко всем остальным вершинам.

Таблица 2

Матрица весов дуг исходного графа		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
$C =$	x_1		12	13				9	24	7
	x_2	12		8			23	15		5
	x_3	13	8		4		14		24	
	x_4			4		10		14		
	x_5				10		11			
	x_6			14	9	11		4	17	9
	x_7		15		14		4			7
	x_8	24				8	17			13
	x_9	7	5				9	7	13	

Постоянные пометки будем помечать знаком +.

Присвоим $L(x_1) = 0$, $L(x_i) = 100$ для всех x_i , кроме x_1 . Положим $p = x_1$. Эта вершина является первой отображаемой вершиной, с которой в соответствии с выражениями (1) – (2) согласно описанной процедуре производится обновление временных и постоянных пометок для каждой из оставшихся вершин графа (табл. 3).

Таблица 3

Итерационная процедура по обновлению пометок вершин графа

№ итерации	Отображаемая вершина $\Gamma(x_i^*) = \Gamma(p)$	Массивы временных пометок вершин графа	Кратчайший путь $L(p)$
1	$\Gamma(x_1) = \{x_2, x_3, x_7, x_8, x_9\}$	$L(x_2) = \min[L(x_2), L(x_1) + c(x_1, x_2)] = \min[100, 0 + 12] = 12$ $L(x_3) = \min[L(x_3), L(x_1) + c(x_1, x_3)] = \min[100, 0 + 13] = 13$ $L(x_4) = 100$ $L(x_5) = 100$ $L(x_6) = 100$ $L(x_7) = \min[L(x_7), L(x_1) + c(x_1, x_7)] = \min[100, 0 + 9] = 9$ $L(x_8) = \min[L(x_8), L(x_1) + c(x_1, x_8)] = \min[100, 0 + 24] = 24$ $L(x_9) = \min[L(x_9), L(x_1) + c(x_1, x_9)] = \min[100, 0 + 7] = 7$	$L(x_9) = 7^+$
2	$\Gamma(x_9) = \{x_1, x_2, x_6, x_7, x_8\}$	$L(x_2) = \min[12, 7 + 5] = 12$ $L(x_3) = 13$ $L(x_4) = 100$ $L(x_5) = 100$ $L(x_6) = \min[100, 7 + 9] = 16$ $L(x_7) = \min[9, 7 + 7] = 9$ $L(x_8) = \min[24, 7 + 13] = 20$	$L(x_7) = 9^+$
3	$\Gamma(x_7) = \{x_2, x_4, x_6, x_9\}$	$L(x_2) = \min[12, 9 + 15] = 12$ $L(x_3) = 13$ $L(x_4) = \min[100, 9 + 14] = 23$ $L(x_5) = 100$ $L(x_6) = \min[16, 9 + 4] = 13$ $L(x_8) = 20$	$L(x_2) = 12^+$
4	$\Gamma(x_2) = \{x_1, x_3, x_6, x_7, x_9\}$	$L(x_3) = \min[13, 12 + 8] = 13$ $L(x_4) = 23$ $L(x_5) = 100$ $L(x_6) = \min[13, 12 + 23] = 13$ $L(x_8) = 20$	$L(x_3) = 13^+$
5	$\Gamma(x_3) = \{x_1, x_2, x_4, x_6, x_8\}$	$L(x_4) = \min[23, 13 + 4] = 17$ $L(x_5) = 100$ $L(x_6) = \min[13, 13 + 14] = 13$ $L(x_8) = \min[20, 13 + 24] = 20$	$L(x_6) = 13^+$
6	$\Gamma(x_6) = \{x_3, x_4, x_5, x_7, x_8, x_9\}$	$L(x_4) = [17, 13 + 9] = 17$ $L(x_5) = \min[100, 13 + 11] = 24$ $L(x_8) = \min[20, 13 + 17] = 20$	$L(x_4) = 17^+$
7	$\Gamma(x_4) = \{x_3, x_5, x_6, x_7\}$	$L(x_5) = \min[24, 17 + 10] = 24$ $L(x_8) = 20$	$L(x_8) = 20^+$
8	$\Gamma(x_8) = \{x_1, x_5, x_6, x_7, x_9\}$	$L(x_5) = \min[24, 20 + 8] = 24$	$L(x_5) = 24^+$

По окончании итерационной процедуры все вершины графа имеют постоянные отметки (рис. 3). Таким образом, алгоритм завершен.

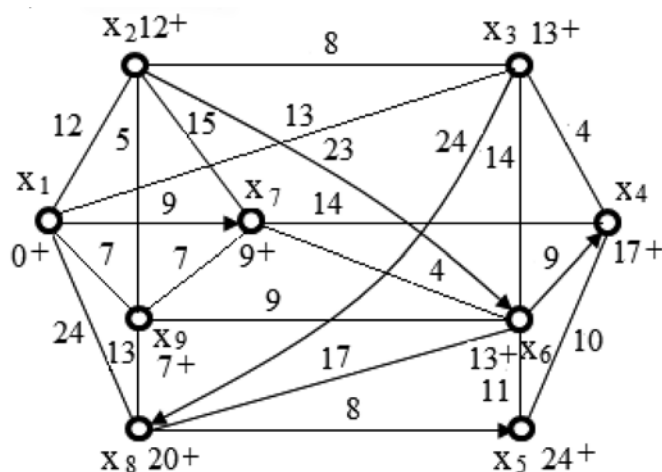


Рис. 3. Граф с постоянными отметками во всех вершинах

Для нахождения кратчайшего пути между вершинами, например x_2 и начальной x_1 , последовательно используем соотношение (3)

$$L(x'_2) + c(x'_2, x_2) = L(x_2) = 12,$$

где вершина x'_2 — это вершина, непосредственно предшествующая x_2 в кратчайшем пути от x_1 к x_2 .

Одной из таких вершин является вершина x_9 . Далее соотношение (3) применяем второй раз

$$L(x'_9) + c(x'_9, x_9) = L(x_9) = 7.$$

Непосредственно предшествующей вершине x_9 является вершина x_1 . Поэтому кратчайший путь от x_1 к x_2 есть (x_1, x_9, x_2) . Вершина x_1 , называемая базой и дающая все кратчайшие пути от x_1 , представляет дерево.

Реализация в среде MatLab. Для проведения расчетов кратчайших расстояний от стартовой вершины x_1 до каждой из вершин $x_i \neq x_1$ ($i=1, \dots, n$) по оптимизационной схеме на основе рассмотренного алгоритма из восьми итераций разработана программа в кодах MatLAB (License Attributes: version R2010b, license number:358625), позволяющая получить численные значения кратчайших путей в исходном графе.

В итерационной процедуре используются следующие обозначения:

C — матрица весов дуг (ребер), значения элементов в которой выбраны из табл. 2. Отсутствующие значения в элементах матрицы заполнены числами 100, заведомо большими любого потенциального пути;

L — одномерный массив временных пометок каждой из вершин графа;

LP — одномерный массив кратчайших расстояний (постоянных пометок) каждой из вершин графа;

P — одномерный массив номеров вершин графа, отмеченных постоянными пометками;

I — номер итерации.

При реализации алгоритма разработана программа в кодах MatLab и получены следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4

Основные результаты реализации рекурсивной процедуры

№ итерации (I)	Массивы временных пометок (L)	Массивы номеров вершин (P)	Массивы постоянных пометок (LP)
1	100 12 13 100 100 100 9 24 7	1 0 0 0 0 0 0 9	0 0 0 0 0 0 0 7
2	100 12 13 100 100 16 9 20 100	1 0 0 0 0 0 7 0 9	0 0 0 0 0 0 9 0 7
3	100 12 13 23 100 13 100 20 100	1 2 0 0 0 0 7 0 9	0 12 0 0 0 0 9 0 7

Таблица 4
(Окончание)

4	100 100 13 23 100 13 100 20 100	1 2 3 0 0 0 70 9	0 12 13 0 0 0 9 0 7
5	100 100 100 17 100 13 100 20 100	1 2 3 0 0 6 7 0 9	0 12 130 0 13 9 0 7
6	100 100 100 17 24 100 100 20 100	1 2 3 4 0 6 7 0 9	0 12 13 17 0 139 0 7
7	100 100 100 100 24 100 100 20 100	1 2 3 4 0 6 7 8 9	0 1213 170 13 9 20 7
8	100 100 100 100 24 100 100 100 100	12 3 4 5 6 7 8 9	0 12 13 17 24 13 9 20 7

Анализ результата. Полученные программным способом значения кратчайших путей от стартовой (первой) вершины до всех остальных вершин взвешенного графа представлены в табл. 5.

Таблица 5

Кратчайшие расстояния до вершин графа

Номера вершин	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кратчайшие расстояния	0	12	13	17	24	13	9	20	7

Выводы

1. Разработана универсальная компьютерная модель, позволяющая автоматизировать операции определения кратчайших маршрутов движения материальных грузопотоков в логистических системах с двусторонним движением (как в прямом, так и в обратном направлении) грузопотоков.

2. Предложена итерационная модель на основе рекурсивной процедуры определения последовательностей ребер, из которых состоит рассматриваемый кратчайший путь. Для выполнения технологических расчетов на основе рекурсивных уравнений вводятся переменные состояния в виде временных и постоянных отметок вершин графа, что позволило использовать для расчетов функции инструментарий Optimization Toolbox среды MatLab.

3. Корректность и эффективность предложенной процедуры подтверждена на конкретном примере автоматизации расчета кратчайших путей с полным анализом возможных вариантов с размерностью вектора состояния $n = 9$.

4. Приведенная модель расчета, реализованная в кодах MatLab, может быть использована не только для автоматизации логистических систем на водном транспорте, но и в телекоммуникационных системах пакетной передачи данных [14], в системах оптимизации маршрутных карт российских регионов [13], а также в других системах автоматизации и управления высокой сложности [14], [15] различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // Numerische Mathematik. — 1959. — Vol. 1. — Pp. 269–271.
2. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLab: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
3. Чертков А. А. Автоматизация определения критического пути в логистической системе / А. А. Чертков, А. А. Вардомская, А. А. Дмитриев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 194–200.
4. Чертков А. А. Итерационный алгоритм выбора оптимальной стратегии группового взаимодействия подвижных объектов / А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 207–215.
5. Дейкстра Э. Дисциплина программирования / Э. Дейкстра. — М.: Мир, 1978. — 275 с.
6. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. — 2-е изд. — М.: ИД «Вильямс», 2010. — 1296 с.

7. Левитин А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. — М.: ИД «Вильямс», 2006. — 565 с.
8. Russell J. Алгоритм Дейкстры / J. Russell, R. Cohn. — Изд-во VSD, 2012. — 112 с.
9. Охорзин В. А. Оптимизация экономических систем / В. А. Охорзин. — М.: Финансы и статистика, 2005. — 144 с.
10. Романовский И. В. Дискретный анализ / И. В. Романовский. — 4-е изд., испр. и доп. — СПб.: Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2008. — 336 с.
11. Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D'Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — № 3. — Pp. 774–788. DOI:10.1016/J.EJOR.2014.12.039.
12. Reich D. A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — № 3. — Pp. 487–494. DOI:10.1016/J.EJOR.2013.04.049.
13. Соколов А. В. Разработка технологических дорожных карт / А. В. Соколов, О. И. Карасев // Российские нанотехнологии. — 2009. — Т. 4. — № 3–4. — С. 16–17.
14. Оре О. Теория графов / О. Оре. — М.: Изд-во Либроком, 2009. — 354 с.
15. Бояринцева Т. И. Теория графов: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Дискретная математика» / Т. И. Бояринцева, А. А. Мاستихина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 40 с.

A RECURSIVE METHOD OF OPTIMIZATION OF THE LOGISTIC WAYS BY MEANS OF MATLAB

Methods and tools for optimization the logistic systems and their elements in terms of market institutions development, play the main role in the creation of new mechanisms to improve the efficiency and quality of the objects of water transport and transport infrastructure in general. Modern theory and numerical methods are means to make scientifically sound decisions in the management of technological systems and vehicles using models and computer technologies, fast and low cost resources and time to adjust when changes in the volume and market conditions in the relevant sectors, the provision of transport services. Is a recursive method to optimize traffic logistics systems with the use of computer technologies by means of MATLAB in order to increase the level of organization and management of transportation and logistics systems with correction by status. A recursive method, unlike the existing, you can automate the shortest path is the delivery of the goods in the transport network with complex topology, implemented through a weighted graph, given the quality criterion As a result of the proposed algorithm and recursive procedure for method realization optimization and reducing the execution time of the transport operation. Concrete example for determine the shortest path to confirm the correctness of the proposed technical solution is considered.

Keywords: automation, algorithm, logistic, directed graph, critical path, the target functionality, model, quality criterion.

REFERENCES

1. Dijkstra, E. W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische Mathematik* 1 (1959): 269-271.
2. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obekтах vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. — SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2015.
3. Chertkov, A. A., A. A. Vardomsкая, and A. A. Dmitriev. "Automation to define critical way in logistical system." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 194-200.
4. Chertkov, A. A. "An iterative algorithm for choosing the optimal strategy of group interaction for moving objects." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 207-215.
5. Deijkstra, Je. *Disciplina programirovaniya*. M.: Mir, 1978.

6. Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. *Algoritmy: postroenie i analiz.* – 2-e izd. Per. s angl. M.: Izdatelskij dom «Vilijams», 2010.
7. Levitin, A. V. *Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz.* M.: Izdatelskij dom «Vilijams», 2006.
8. Russell, Jesse, and Ronald Cohn. *Algoritm Dejkstry.* Izd-vo VSD, 2012.
9. Ohorzin, V. A. *Optimizacija jekonomicheskikh sistem.* M.: Finansy i statistika, 2005.
10. Romanovsky, I. V. *Diskretnyj analiz. 4-e izd., ispr. i dop.* SPb.: Nevskij Dialekt, BHV-Peterburg, 2008.
11. D'Ambrosio, C., A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli. "Mathematical programming techniques in water network optimization." *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774-788. DOI:10.1016/J.EJOR.2014.12.039.
12. Reich, Daniel. "A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints." *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487-494. DOI:10.1016/J.EJOR.2013.04.049.
13. Sokolov, A. V., and O. I. Karasev. "Razrabotka tehnologicheskikh dorozhnykh kart." *Rossijskie nanotehnologii* 4.3-4 (2009): 16-17.
14. Ore, O. *Teorija grafov.* Izdatelstvo: Librokom, 2009.
15. Bojarinceva, T. I., and A. A. Mastihina. *Teorija grafov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju domashnego zadaniya po kursu «Diskretnaja matematika».* M.: MGTU im. N. Je. Baumana, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова».
chertkov51@mail.ru
Вардомская Анна Александровна — аспирант.
Научный руководитель:
Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru
Дмитриев Александр Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov Alexandr Alexandrovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru
Vardomskaya Anna Alexandrovna — postgraduate.
Supervisor:
Baryshnikov Sergej Olegovich —
Dr. of Technical science, professor, rector
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_osnpr@gumrf.ru
Dmitriev Alexandr Alexandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilievich —
Dr. of Technical science, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_osnpr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 7 октября 2015.

УДК 681.3.015

Н. Ю. Барышникова

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗАПРОСОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Современные достижения в области информационных технологий проявляются в создании и развитии интеллектуальных информационных систем, обеспечивающих хранение и изменение необходимых пользователю данных, а также их получение по требованию. В статье описан метод реализации формального механизма преобразования запроса к данным на проблемно-ориентированном подмножестве естественного языка в информационной системе. За основу взята система электронного тестирования для подготовки морских специалистов. Разработан алгоритм функционирования механизма, позво-

ляющий существенно сократить и упростить процесс формирования произвольных отчетов с целью анализа и определения структуры организации, приоритетных должностей и т. д. для дальнейшего решения кадрового вопроса. Алгоритм реализован на некоем формальном подмножестве естественного языка, которое ограничено двумя классами предложений: простые вопросительные и побудительные. Рассмотрен подробный пример выполнения запроса на этапах лексического и синтаксического анализа с последующей трансляцией на язык запросов к информационной системе и предоставлением конечного результата пользователю.

Ключевые слова: диалог, запрос, естественный язык, тестовая система, морские специальности, компетенции, обучение, лексический анализ, синтаксический анализ.

Введение

С целью организации подготовки морских специалистов [1], [2] на кафедре вычислительных систем и информатики успешно разработана и внедрена в эксплуатацию распределенная информационная система электронного тестирования для оценки соответствия профессиональным компетенциям [3], [4], реализованная на платформе «1С: Предприятие 8» на основе адаптированной типовой конфигурации «1С: Электронное обучение. Экзаменатор» [5].

Для определения результатов [6] прохождения тестов и факторов, их обуславливающих, большое внимание при создании программного продукта было отведено статистическому анализу данных. Здесь прослеживается прямая зависимость от предусмотренного разработчиком набора отчетов информационной системы, создаваемых на основе итоговых результатов тестирований пользователей. Полученная информация позволяет руководителям и разработчикам в дальнейшем вносить соответствующие корректировки в процесс тестирования. Например, информационная система [7], [8] позволяет анализировать качество тестов на основании целого ряда параметров: количество и качество верных и неверных ответов на вопросы, затраченное на ответы время и т. д. Это дает возможность получать обратную связь об уровне подготовки тестируемых, сложности теста, характерных ошибках при выполнении теста, что важно для дальнейшего совершенствования учебных материалов и тестов. Также проанализировав конечные результаты, можно определить приоритетные для организации должности. Стоит отметить, что с возрастанием числа участников тестирования, растет и точность получаемых статистических выводов.

Однако часто встречается ситуация, когда информации, полученной из стандартных отчетов, содержащихся в программном продукте, недостаточно, или требуется получить более детальную расшифровку результатов. Обычно для решения задач такого рода необходимо прибегнуть к использованию средств программирования, требующих от пользователя достаточно высокой квалификации, четкого понимания структуры и наполнения базы данных, ее динамически изменяющейся структуры и объема. В соответствии с этим активно создаются и развиваются интеллектуальные информационные системы, обеспечивающие хранение и преобразование необходимых пользователю данных, а также их получение по требованию. Однако средств, которые в полной мере предоставляли бы возможность исполнять запросы пользователя, сформулированные на естественном языке (ЕЯ), до сих пор нет. В полной мере такими средствами нельзя считать и специализированные языки запросов (например, 1CQ, SQL, MDX), поскольку они требуют достаточно высокой квалификации.

В настоящей работе приведен разработанный формальный [9] – [11] механизм интеллектуального доступа в информационной системе посредством организации диалога и последующего анализа запросов на ЕЯ. Создание интуитивно-понятного анализатора позволяет значительно увеличить эффективность работы пользователя. Стоит отметить, что ЕЯ выбран благодаря достоинствам, которыми он обладает с точки зрения обычного пользователя:

- ЕЯ не требует специальной подготовки в освоении пользователем;
- языковые конструкции, в том числе в их проблемно-ориентированном ограниченном виде, просты и понятны всем пользователям информационной системы;

– компоненты структуры информационной системы описываются терминами ЕЯ как во внутреннем, так и во внешнем представлении.

Постановка задачи

Постановку задачи в общем виде можно сформулировать следующим образом: разработать формальный механизм преобразования запроса к данным на проблемно-ориентированном подмножестве ЕЯ в язык запросов к информационной системе. Далее этот запрос должен быть выполнен информационной системой и возвращен результат или сообщение об ошибке с осмысленными пояснениями причин ее возникновения.

Организация диалога в рамках информационной системы на ЕЯ

Разработанный формальный механизм учитывает ограниченный функционал информационной системы, определяемый объектом автоматизации, т. е. системой электронного тестирования для подготовки морских специалистов. Взаимодействие осуществляется между человеком [12], в роли которого может выступать как работник или претендент на должность, так и организатор тестирования, и информационной системой. Главной задачей механизма является преобразование запросов на проблемно-ориентированном подмножестве ЕЯ в язык запросов к базе данных с целью получения необходимой выборки.

В целом алгоритм функционирования разработанного формального механизма основан на следующих этапах [13]:

- поддержка интеллектуального ввода пользователем запроса на ЕЯ на основе заполненных словарей с возможностью задания параметров;
- выполнение лексического анализа запроса;
- выполнение синтаксического анализа запроса;
- автоматическая генерация текста запроса на язык запросов 1CQ (язык запросов среды «1C: Предприятие 8»);
- выполнение запроса информационной системой, вывод конечных результатов пользователю или сообщение об ошибке.

На основе разработанного алгоритма детально рассмотрим пример его работы по анализу простейшего запроса на ЕЯ «Показать результаты теста участников на должность капитан».

Работа механизма начинается с ввода запроса на ЕЯ и, при необходимости, задания параметров. Был реализован диалог, предполагающий ввод некоторого произвольного текста в специальные поля формы. В большинстве случаев это приводит к возникновению ошибок со стороны пользователя. На этот случай механизм оснащен интеллектуальной составляющей. Осуществляется анализ входного запроса и решение целого ряда задач, связанных с поиском в нем информации определенной структуры, последующей проверкой данных, поступивших от пользователя, и их возможной модификацией. Также с целью сокращения возникновения заведомо очевидных ошибок используются некоторые ограничения, относящиеся к проблемно-ориентированному подмножеству ЕЯ, что позволяет упростить работу по разбору предложения на каждом последующем этапе анализа. На основании этого вся совокупность входных запросов была ограничена двумя классами предложений [14]: простые вопросительные предложения («Каков...?») и побудительные предложения («Показать...»). При вводе запроса на ЕЯ пользователь пошагово набирает слова, при этом информационная система, на основе заполненных ранее словарей, ограничивает круг предлагаемых вариантов в зависимости от предыдущего введенного слова и предоставляет интеллектуальную подсказку. В результате получаем структуру фразы вида

$$C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7 \quad (1)$$

где C_n — слова входящего запроса на ЕЯ.

Разбор исходного запроса на ЕЯ всегда начинается с этапа лексического анализа, представляющего собой процесс определения слов и дальнейшего заполнения на их основе таблицы лексем, где каждой лексеме в соответствие ставится набор определенных характеристик, таких как

часть речи, род, число и т. д. На основе внесенных в информационную систему наборов правил осуществляется разбор входной конструкции. В результате формируется системная таблица лексем следующего вида

Системная таблица лексем

L_1	X_1
L_2	X_2
L_3	X_3
L_4	X_4
L_5	X_5
L_6	X_6
L_7	X_7

Здесь L_n — лексема, составляющая входящий запрос; X_n — характеристика, соответствующая лексеме.

Выходная информация, полученная на этапе лексического анализа, передается для дальнейшей обработки на этап синтаксического анализа, основной задачей которого является сопоставление линейной последовательности лексем с формальной входной грамматикой языка. В результате получаем разобранную синтаксическую структуру предложения.

Представим вариант формальной грамматики G , на основе которой выполняется простейший синтаксический анализ:

```
<предложение>::=<побудительное>.<вопросительное>?
<побудительное>::=показать<существительное><существительное><существительное>
<обстоятельство><параметр>|
найти<существительное><существительное><существительное><обстоятельство>
<параметр>|
вывести<существительное><существительное><существительное><обстоятельство>
<параметр>|
отобразить<существительное><существительное><существительное><обстоятельство>
<параметр>
<вопросительное>::=каковы<существительное><существительное><существительное>
<обстоятельство><параметр>|
какие<существительное><существительное><существительное><обстоятельство>
<параметр>
<обстоятельство>::=на<существительное>
<существительное>::=результаты|участников|теста|должность
<параметр>::=капитан
```

Синтаксическое дерево [15], полученное после выполнения текущего этапа работы механизма, используется как источник данных для следующего этапа, где требуется произвести генерацию кода, т. е. автоматическое создание программного кода на языке 1CQ — стандартный язык запросов платформы «1С: Предприятие 8». Одной из возможных форм внутреннего представления программы служат триады — многоадресный код с неявно именуемым результатом. Они позволяют преобразовать собственную последовательность в последовательность команд результирующей программы. Запрос «Показать результаты теста участников на должность капитан» в записи с использованием триад принимает следующий вид.

1. Задание параметра (параметр, капитан).
2. Задание существительного (существительное, должность).
3. Задание определения (^2, ^1).

4. Задание предлога (предлог, на).
5. Задание существительного (существительное, участников).
6. Задание существительного (существительное, теста).
7. Задание существительного (^6, ^5).
8. Задание существительного (существительное, результаты).
9. Задание существительного (^8, ^7).
10. Задание дополнения (^4, ^3).
11. Задание дополнения (^9, ^10).
12. Задание глагола (глагол, показать).
13. Задание сказуемого (сказуемое, ^12).
14. Задание предложения (^13, ^11).

На завершающем этапе работы формального механизма с помощью триад производится автоматическая генерация кода на языке 1CQ в специально разработанном модуле. Фактически получается, что это программа, создающая программный запрос. Генератор получает на входе информацию о структуре, данных и параметрах предметной области и шаблоны, по которым будет выполняться генерация, а на выходе выводит готовый программный код. В конце работы организуется предоставление результатов пользователю или сообщение об ошибке.

Организация разбора запросов на ЕЯ со сложными связями

Ранее рассмотренный пример является достаточно простым. Большой интерес представляет задача разбора запроса на ЕЯ с выборкой информации из различных таблиц со сложными связями (например, один ко многим или многие ко многим) [16]. Пусть пользователь информационной системы вводит запрос на ЕЯ «Выбрать всех участников тестирований». В соответствии с реализованным алгоритмом функционирования формального механизма игнорируется незначущая лексема «всех».

Часто корневой вершиной дерева будет являться лексема, указывающая на необходимость осуществления выборки (например, вывести, показать, найти). Для упрощения работы лексемы заранее описаны в словаре. Исходя из этого дальнейшие действия по разбору запроса на ЕЯ будут производиться только для вершин потомков. При первом проходе после лексического анализа на этапе синтаксического анализа осуществляется поиск грамматической основы «участник» в названиях таблиц и их полей в базе данных для ограничения круга выборки. В результате будет найдена таблица «УчастникиТестирований», хранящаяся в информационной системе в виде регистра сведений. Так как больше никаких вершин в синтаксическом дереве нет и никаких особых условий выборки в запросе указано не было, то автоматически генерируется запрос на языке 1CQ.

Рассмотрим более сложный запрос «Выбрать всех участников теста на должность капитан». Информационная система, как и в предыдущем случае, удаляет избыточную информацию, а именно, лексемы «всех» и «теста». В результате получается линейное синтаксическое дерево. В этом случае до вершины «участников» система повторяет действия из предыдущего примера, а затем производится анализ для последующих дочерних вершин, которые уточняют требуемую выборку информации посредством фильтрации по виду теста. Поскольку в запросе на ЕЯ нет уточнения относительно периода запрашиваемых данных, то по умолчанию система организует выборку участников тестирования на должность капитана в текущем году.

Этот запрос также можно считать относительно простым. Представим запрос с неоднозначной связью таблиц. До прохождения тестирования пользователь регистрируется в информационной системе электронного тестирования. При этом его личные данные и характеристики выбранного теста попадают в таблицу (регистр сведений) «УчастникиТестирований». По окончании прохождения теста вся информация о результатах попадает в другую таблицу (регистр сведений) — «ПрохождениеТестирований». Обе эти таблицы имеют связь один ко многим и хранят ссылку на пользователя и тест, которые в свою очередь ссылаются на записи в таблице пользователей (Справочник.Пользователи) и тестов (Справочник.Тесты). Пользователь вводит

запрос на ЕЯ «Выбрать всех участников тестирования на должность капитан и их среднюю продолжительность тестирования в секундах за ноябрь 2014 года», который относится к совокупности взаимосвязанных таблиц, описанных ранее. В результате информационная система составляет следующее синтаксическое дерево.



Сложное синтаксическое дерево

На основании синтаксического дерева составляется временный список объектов для лексемы «выбрать». В данном случае это лексемы: «участников» и «продолжительность». Затем происходит перебор всех таблиц в информационной системе в поисках одновременного вхождения этих лексем и их синонимов. В таблице «ПрохождениеТестирований» нет участников как таковых, но она является внешним ключом к таблице «Пользователи», которая содержит нужную информацию. Таким образом, механизм обнаруживает вхождение лексемы «участник». Результатом этого будет выбор полей и записей, удовлетворяющих запросу. После обхода всех остальных таблиц информационная система установит, что это единственный возможный вариант, при этом не требуется дополнительная обработка запроса на ЕЯ. Затем происходит объединение лексем «секундах» и «продолжительность» на единую лексему «продолжительность в секундах» в связи с совпадением семантики [17] подчинения данного набора лексем со словарной семантикой сущности [18] – [20]. В завершении работы анализа происходит добавление условия выборки данных «за ноябрь 2014 года». Сложность заключается в определении того, к чему собственно указанная дата относится. Так в синтаксическом дереве дата относится к продолжительности тестирования, а в таблице «УчастникиТестирований» поля даты нет. Информационная система начинает просматривать связанные таблицы, имеющие ключевое поле с типом «Дата». В результате организуется связь с таблицей «ПрохождениеТестирований», в которой поле дата присутствует. При проведении дальнейшего анализа информационной системой больше не будет выявлено никаких дат.

На этапе ввода запроса на ЕЯ пользователю требуется задать параметры запроса для данного случая в значения «01.11.2014» и «30.11.2014» соответственно, иначе появится сообщение об ошибке. Ввиду отсутствия дополнительных условий и альтернативных вариантов запроса происходит его выполнение и вывод результата пользователю. Также информационная система обладает возможностью конвертации запроса на язык SQL [21], [22].

Выводы

1. На основе реализации механизма разработано формальное описание проблемно-ориентированного подмножества ЕЯ.
2. Разработан алгоритм функционирования механизма.
3. Организована возможность конвертации запроса с языка 1CQ на язык SQL.
4. Корректность работы и эффективность предложенного механизма подтверждена на рассмотренных в статье примерах.

В качестве основной особенности реализованного механизма следует отметить, что интеллектуальным доступом в информационной системе может воспользоваться любой пользователь. При этом не требуется обладать высокой квалификацией в области программирования. Информационная система выполнит все действия по преобразованию и предоставлению данных самостоятельно. Реализованный простой и удобный интерфейс также позволяет пользователю существенно сократить и упростить процесс формирования произвольных отчетов.

Стоит отметить, что механизм универсален и может быть внедрен в любую информационную систему, а не только использоваться в сфере подготовки кадров по морским специальностям. Для этого перед началом использования требуется заполнить словари в соответствии с выбранной тематикой предметной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарануха С. Н. Информатизация в инновационных образовательных процессах / С. Н. Тарануха, С. С. Соколов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 1. — С. 171–175.
2. Фирсов Ю. Г. Инновационные методики в учебном процессе при подготовке гидрографов / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 123–129.
3. Барышникова Н. Ю. Распределенная тестовая система оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // ИТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы III науч.-исслед. конф. студентов и аспирантов факультета информационных технологий, 19 декабря 2014 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 18–20.
4. Крупенина Н. В. Организация распределенной системы подготовки проведения электронного тестирования для оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. В. Крупенина, Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 216–228.
5. Описание прикладного решения «1С: Электронное обучение. Экзаменатор» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.v8.1c.ru/elo/exam> (дата обращения: 20.02.2015).
6. Григорян М. Г. Информационные резервы сбалансированной системы показателей, используемых для оценки деятельности транспортных предприятий / М. Г. Григорян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 146–154.
7. Егоров А. Н. Система построения и тестирования терминов предметной области естественного языка / А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина // Материалы XIV Санкт-Петербургской междунар. конф. «Региональная информатика (РИ-2014)», Санкт-Петербург, 29–31 октября 2014 г. — СПб.: СПОИСУ, 2014. — С. 329–330.
8. Зацман И. М. Построение системы терминов информационно-компьютерной науки: проблемно-ориентированный подход / И. М. Зацман // Математика. — 2013. — № 4 (10). — С. 115–148.
9. Тимофеева М. К. Естественные и формальные языки: дис. ... д-р филол. наук: 10.02.19 / М. К. Тимофеева. — Новосибирск, 2005. — 323 с.
10. Кан Д. А. Способ формализации связей в тексте при обработке естественно-языковых конструкций / Д. А. Кан, И. С. Лебедев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2008. — № 2. — С. 56–61.
11. Барковский С. С. Подход к формализации семантической структуры текста в системах документооборота / С. С. Барковский, П. В. Желтов, А. М. Лукашов // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. — 2010. — № 2. — С. 96–100.
12. Барышникова Н. Ю. Организация диалога пользователя в системе автоматизации образовательного процесса на языке, близком к естественному / Н. Ю. Барышникова. // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии в образовании» (Применение технологий «1С» для формирования инновационной среды образования и бизнеса), 3–4 февраля 2015 г., ч. 1. — М.: ООО «1С-Паблишинг», 2015. — С. 386–389.
13. Волкова И. А. Введение в компьютерную лингвистику. Практические аспекты создания лингвистических процессоров / И. А. Волкова. — М.: Изд-во МГУ, 2006. — 43 с.
14. Организация диалога удаленного пользователя с подсистемой балльно-рейтингового учета обучения студентов / Н. Ю. Барышникова, А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина, Л. Н. Тындыкарь // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XIV междунар. науч.-практ. конф. «Применение технологий «1С» для повышения эффективности деятельности организаций образования», 28–29 января 2014 г., часть 1. — М.: ООО «1С-Паблишинг», 2014. — С. 331–334.

15. Боярский К. К. Язык правил для построения синтаксического дерева / К. К. Боярский, Е. А. Каневский // Труды XIV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество», Санкт-Петербург, 12-14 октября 2011 г. — СПб.: ООО «МультиПроджектСистемСервис», 2011. — С. 223–237.
16. Кропотова Л. В. Многозначность в естественных языках: способы выявления / Л. В. Кропотова // Вестник Пятигорского государственного лингвистического университета. — 2010. — № 1. — С. 151–153.
17. Мозговой М. В. Семантический анализатор и задача информационного поиска / М. В. Мозговой // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2005. — № 3–4. — С. 54–59.
18. Журавлев А. Е. Организация диалога с информационной системой оперативного учета судопропуска в шлюзах / А. Е. Журавлев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 133–140.
19. Журавлев А. Е. Механизм семантического анализатора запросов к базам данных информационных систем / А. Е. Журавлев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2012. — № 4. — С. 92–101.
20. Журавлев А. Е. Диалог с информационной системой оперативного учета судопропуска в шлюзованной системе на усложненных запросах подмножества естественного языка / А. Е. Журавлев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 114а–123.
21. Смирнов И. В. Перевод запросов, сформулированных на естественном языке, на язык SQL / И. В. Смирнов, Ю. Л. Лустгартен // Вестник Костромского государственного технологического университета. — 2006. — № 13. — С. 96–100.
22. Ердесов С. Ж. Способы трансляции выборки с естественного языка на язык SQL / С. Ж. Ердесов // Научная перспектива. — 2014. — № 4. — С. 215.

DEVELOPMENT OF A MECHANISM FOR TRANSFORMING NATURAL LANGUAGE QUERY IN THE INFORMATION SYSTEM

At the user level, modern advances in information technology are manifested in the creation and development of the intelligent information systems for storing and change the necessary user data, as well as receive them on demand. Describes a method for implementing a formal mechanism for the conversion request to the data on problem-oriented subset of natural language processing in information system. It based on the testing system for the preparation of marine professionals. The algorithm of functioning of the mechanism, which allows significantly divide out and oversimplify the process of forming arbitrary reports to analyse and define the structure of the Organization, priority posts, etc. for further address the staffing issue. Algorithm is implemented on some formal natural language subset, which limited by two classes of proposals: a simple interrogative and motive. Considered a detailed example of query execution on the stages of the lexical and syntactic analysis with subsequent translation into the language of the query to the information system and providing the final result to the user.

Keywords: dialog, query, natural language, test system, maritime specialties, competencies, education, lexical analysis, syntactic analysis.

REFERENCES

1. Taranukha, S. N., and S. S. Sokolov. “Infomatization in innovative educational processes.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 1 (2010): 171–175.
2. Firsov, Ju. G. “Hydrographic innovative education methodology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 123–129.
3. Baryshnikova, N. Ju., and L. N. Tyndykar. “Distributed test system for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties.” *IT: VCHERA, SEGODNYA, ZAVTRA: materialy III nauchno-issledovatel'skoy konferentsii studentov i aspirantov fakulteta informatsionnykh tekhnologiy, 19 dekabrya 2014 g.* SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2015: 18–20.
4. Krupenina, N. V., N. Ju. Baryshnikova, and L. N. Tyndykar. “Organization of a distributed system by electronic testing for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 216–228.
5. Opisanie prikladnogo resheniya “1C: Elektronnoye obucheniye. Ekzamenator”. Web. 20 February 2015 <<http://www.v8.1c.ru/elo/exam>>.

6. Grigoryan, M. G. "The balanced scorecard information reserves for evaluation of transport enterprises activity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2013): 146–154.
7. Egorov, A. N., and N. V. Krupenina. "Sistema postroyeniya i testirovaniya terminov predmetnoy oblasti yestestvennogo yazyka." *Materialy XIV Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii "Regionalnaya informatika (RI-2014)"*, Sankt-Peterburg, 29–31 oktyabrya 2014 g. SPb.: SPOISU, 2014: 329–330.
8. Zatsman, I. M. "Postroyeniye sistemy terminov informatsionno-kompyuternoy nauki: problemno-oriyentirovanny podkhod." *Metafizika* 4(10) (2005): 115–148.
9. Timofeeva, M. K. Yestestvennyye i formalnyye yazyki: Abstract of Dr. (Phil.) dissertation. Novosibirsk, 2005.
10. Kan, D. A., and I. S. Lebedev. "Method of formalizing semantical links between objects in a natural language text." *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes* 2 (2008): 56–61.
11. Barkovskii, S. S., P. V. Zheltov, and A. M. Lukashov. "On one approach to formalization of model for semantic structure of texts in systems of documents circulation." *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* 2 (2010): 96–100.
12. Baryshnikova, N. Ju. "The organization a users dialogue in the automation system of the educational process in a language close to the natural." *Novyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii: Sbornik nauchnykh trudov VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Novyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii" (Primeneniye tekhnologii "IC" dlya formirovaniya innovatsionnoy sredy obrazovaniya i biznesa)*, 3–4 fevralya 2015 g., chast 1. M.: OOO "IC-Publishing", 2015: 386–389.
13. Volkova, I. A. *Vvedeniye v kompyuternuyu lingvistiku. Prakticheskiye aspekty sozdaniya lingvisticheskikh protsessorov*. M.: MGU, 2006.
14. Baryshnikova, N. Ju., A. N. Egorov, N. V. Krupenina, and L. N. Tyndykar. "The organization of a dialog of the remote access users with a subsystem ball-rating accounting of the training of students." *Novyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii: Sbornik nauchnykh trudov VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Primeneniye tekhnologii "IC" dlya povysheniya effektivnosti deyatelnosti organizatsiy obrazovaniya"*, 28–29 yanvarya 2014 g., chast 1. M.: OOO "IC-Publishing", 2014: 331–334.
15. Boyarskiy, K. K., and E. A. Kanevskiy. "Yazyk pravil dlya postroyeniya sintaksicheskogo dereva." *Trudy XII Vserossiyskoy obyedinennoy konferentsii "Internet i sovremennoye obshchestvo"*, Sankt-Peterburg, 12–14 oktyabrya 2011 g. SPb.: OOO "MultiProdzhektSistemServis", 2011: 223–237.
16. Kropotova, L. V. "The phenomenon of polysemy in the natural language: ways of revealing." *Pyatigorsk State Linguistic University Bulletin* 1 (2010): 151–153.
17. Mozgovoy, M. V. "Semantical analyzer and the problem of text retrieval." *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes* 3–4 (2005): 54–59.
18. Zhuravlev, A. E. "Dialogue organization with information system of operational registration of locking." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 3 (2012): 133–140.
19. Zhuravlev, A. E. "Queries semantic analyzer to information systems databases technology." *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes* 4 (2012): 92–101.
20. Zhuravlev, A. E. "Dialogue with gateway locking operational registration information system by complicated queries of natural language subset." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 4 (2012): 114a–123.
21. Smirnov, I. V., and Ju. L. Lustgarten. "Perevod zaprosov, sformulirovannykh na yestestvennom yazyke, na yazyk SQL." *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* 13 (2006): 96–100.
22. Erdesov, S. Zh. "Sposoby translyatsii vyborki s yestestvennogo yazyka na yazyk SQL." *Nauchnaya perspektiva* 4 (2014): 215.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барышниковна Надежда Юрьевна —
аспирант, старший преподаватель.
Научный руководитель:
Крупенина Наталия Викторовна —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
BaryshnikovaHU@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Baryshnikova Nadezhda Yurievna —
Postgraduate, Senior lecturer.
Supervisor:
Krupenina Nataliya Viktorovna —
PhD, associate professor.
BaryshnikovaHU@gumrf.ru
Admiral Makarov State University
of Maritime and Island Shipping

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи подготавливаются в текстовом редакторе Microsoft Word 2003 и представляются в печатном виде на одной стороне страницы формата А4 и в электронном — на любом носителе или по электронной почте. В тексте статьи устанавливается автоматическая расстановка переносов. Размер полей текста устанавливается равным 25 мм со всех сторон. Ориентация страниц — книжная. Текст набирается шрифтом Times New Roman.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

- УДК набираются прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по левому краю;
- инициалы и фамилия автора (авторов) набираются строчными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю. Ученая степень и ученое звание авторов (при наличии) — строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- полное название организации набирается строчными буквами обычным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по правому краю;
- название статьи на русском и английском языках набирается прописными буквами полужирным шрифтом размером 11 pt с выравниванием по центру;
- аннотация и ключевые слова на русском и английском языках набираются строчными буквами курсивом размером 10 pt с выравниванием по ширине (аннотация 100–150 слов на русском языке, перевод на англ. языке, допускается расширенная аннотация на англ. языке (до 500 слов) или графическая аннотация);
- основной текст набирается строчными буквами размером 11 pt с выравниванием по ширине. Отступ первой строки — 1,25 см;
- статья обязательно должна содержать список используемой литературы (не менее 10–15 наименований по ГОСТ Р 7.0.5-2008), ссылки нумеруются в тексте статьи в порядке увеличения, рекомендуется использовать релевантные источники, ссылки на труднодоступные источники информации отклоняются, не рекомендуется использовать ссылки на литературу старше 10 лет;
- межстрочный интервал — одинарный;
- таблицы набираются в текстовом редакторе Microsoft Word. Над таблицей указывается ее номер, затем название;
- номер и название рисунков пишутся под ними;
- формулы набираются с помощью Math Type 6.0.

С требованиями по оформлению статей можно ознакомиться на официальном сайте журнала <http://journal.gumrf.ru>. На сайте также представлены полнотекстовые версии Вестника. Авторские экземпляры распространяются по подписке.

Направив в редакцию рукопись, автор подтверждает свое согласие на публикацию рукописи в открытой печати и на размещение в сети интернет в открытом доступе. В журнал автором направляются следующие материалы: текст статьи, анкета автора, одна внешняя рецензия, заверенная печатью организации (дополнительно для аспирантов — отзыв научного руководителя) и экспертное заключение. Все поступившие материалы проходят проверку в системе, реализующей технологию проверки текстовых документов на наличие заимствований «Антиплагиат». Редакция придерживается Кодекса этики научных публикаций (<http://publicet.org/code/>) и проявляет нетерпимость к плагиату.

Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы. Число авторов статьи — не более трех человек.

Предоставленные материалы первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ. При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются. Авторы статей несут полную ответственность за предоставленные материалы, в том числе за соблюдение правил публикации материалов в открытой печати.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов осуществляется бесплатно.

Электронный адрес редакции: journal@gumrf.ru

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 6 (34)

2015 год

Выпускающие редакторы
Н. А. Карамзина, Т. В. Середова
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 19.12.15. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26,75. Тираж 500 экз. Заказ № 673/15

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7