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 4 (38)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 4 (38). — 250 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.

ISSN 2309-5180
9 772309 518784 >

© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Давыденко А. А., Попов Г. Б. Разработка прототипа интерактивной модели цепи поставок при помощи метода дискретно-событийного моделирования 7

Ершов А. А. Способы выживания людей при морских и речных авариях 15

Пятаков Э. Н., Копанский С. В., Волков Е. Л. Синтез системы бинарной координации при расхождении судов 23

Царик Р. С., Акмайкин Д. А. Разработка алгоритма формирования контейнерного штабеля для обеспечения требуемой видимости с ходового мостика контейнеровоза 29

Кузнецов А. Л., Галин А. В. Методологические принципы управления развитием современного морского порта 43

Гриняк В. М., Трофимов М. В., Люлько В. И. Оценка и представление параметров безопасного движения судна 51

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 62

Афонин А. Б., Ольховик Е. О., Тезиков А. Л. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съёмки рельефа дна 62

Клюев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути 69

Моргунов К. П., Красникова М. В. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов камер шлюзов Волгоградского гидроузла при различных условиях эксплуатации 74

Колосов М. А., Селезнёва Н. В. Защита от дождевых паводков посредством устройства русловых порогов 85

Коношенков А. А. Разработка расчётной модели разрушения грунтовой перемычки в аварийном водосбросе 94

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 105

Сухотерин М. В., Барышников С. О., Аксенов Д. А. Собственные колебания тонких прямоугольных элементов судовых конструкций 105

Купальцева Е. В. Определение пассажировместимости «малого» пассажирского судна на начальной стадии проектирования 113

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 122

Жуков В. А., Безюков О. К., Махфуд М. М. Моторные испытания модифицированного дизельного топлива 122

Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Применение метода измерения шероховатости при испытании материалов втулок цилиндров судовых дизелей на кавитационное изнашивание 131

Орлов Е. И., Петров А. П., Живлюк Г. Е. Стандартизация в отрасли судового, тепловозного и промышленного двигателестроения 138

выпуск 4(38) 2016

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

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.
А. Л. Кузнецов, 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.Ныркov, 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.

Иванченко А. А., Шишкина В. А., Окунев В. Н. Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении 156

Кучеров В. Н. Исследование теплового состояния и модернизация цилиндровых втулок двухтактного среднеоборотного двигателя с вращающимся поршнем 176

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 184

Каретников В. В., Миляков Д. Ф., Милякова Я. Д. Выбор метода дифференциальной коррекции для обеспечения Северного морского пути корректирующей информацией ГНСС ГЛОНАСС/GPS 184

Саушев А. В., Бова Е. В. Параметрический синтез систем управления электроприводов технологических машин портов и судоремонтных заводов 192

Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р., Малышев С. М. Разработка научно-образовательного лабораторно-тренажерного комплекса судовых систем электродвижения и гребных электрических установок нового поколения 203

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ 211

Сазонов А. Е., Сахаров В. В., Чертков А. А. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна 211

Вычужанин В. В., Шибаева Н. О. Повышение эффективности эксплуатации судовых сложных технических систем на основе моделирования и многокритериальной оптимизации 223

Полугина Ю. К., Соколов С. С., Гаскаров В. Д. Совершенствование комбинированной метрики маршрутизации в IP-телефонии на примере транспортно-логистического центра 232

Удалов В. С. Использование системы видеонаблюдения за процесом шлюзования для местоопределения судна в камере шлюза и подходных каналах 241

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 7

Davydenko A. A., Popov G. B. Development of a supply chain interactive model prototype by means of discrete-event simulation 7

Ershov A. A. The ways of survival of people in sea and river accidents 15

Pyatakov E. N., Kopanskiy S. V., Volkov E. L. Synthesis of system of binary co-ordination at divergence of vessels 23

Tsarik R. S., Akmaykin D. A. Development of container stack forming algorithm for ensuring of required visibility from navigation bridge of container ship 29

Kuznetsov A. L., Galin A. V. Methodological principles of modern seaport development 43

Grinyak V. M., Trofimov M. V., Lulko V. I. Data visualization of ship collision avoidance system 51

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 62

Afonin A. B., Ol'hovik E. O., Tezikov A. L. Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern Sea Route depending on the detail of survey of the bottom relief 62

Kljuev V. V. Formalization of the assessment of safety of routes of the Northern Sea Route 69

Morgunov K. P., Krasnikova M. V. Analysis of stress-strain state elements lock chamber Volgograd hydroelectric complex under different operating conditions 74

Kolosov M. A., Selezneva N. V. Rainfall floods protection by the channel rapid structure 85

Konoshenkov A. A. Formulation of calculation model of ground cofferdams destruction in the emergency spillway 94

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 105

Sukhoterin M. V., Baryshnikov S. O., Aksenov D. A. Of natural vibrations of thin rectangular elements of ship structures 105

Kupaltseva E. V. Determining the passenger capacity of a "small" passenger vessel at the initial design stage 113

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 122

Zhukov V. A., Bezjukov O. K., Makhfud M. Motor tests of diesel engine's fuel with modification 122

Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko Ye. O. Using the measurements of roughness in testing materials of ship diesel cylinder liners for cavitation wear 131

Orlov E. I., Petrov A. P., Zhivlyuk G. E. Standardization in the industry of ship, locomotive and industrial engine 138

Ivanchenko A. A., Shishkin V. A., Okunev V. N. Review of experience improvement designs and propulsion systems in modern shipbuilding 156

Kucherov V. N. Investigation heat load and modernization cylinder liner two stroke medium speed diesel engine with rotating piston 176

edition 4(38)
2016

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

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.
A. L. Kuznecov,
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, Profe
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. Sukhoterin,
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.

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 184

Karetnikov V. V., Milyakov D. F., Milyakova Ya. D. Choosing a method of differential correction for providing the Northern Sea Route with GNSS GLONASS/GPS correction information 184

SaushevA.V., Bova E. V. Parametrical synthesis of management systems of electric drives technological machines of ports and repair yards 192

Grigoryev A. V., Zaynullin R. R., Malyshev S. M. Designing of scientific-educational laboratory-training complex of ship electric propulsion systems and electric propulsion plants of new generation 203

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 211

Sazonov A. E., Saharov V. V., Chertkov A. A. A modal method for the synthesis of an observer for heading control 211

Vychuzhanin V. V., Shibaeva N. O. Improving efficiency operation of ship complex technical systems based on modeling and multiobjective optimization 223

Polugina Ju. K., Sokolov S. S., Gaskarov V. D. Improve the performance routing protocols in IP telephony by improving combined metrics on the example of the transport and logistic center 232

Udalov V. S. Usage CCTV system for shiplocking process as ship positional tool in waterlock cell and adjoining channels 241

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

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-7-15
УДК 656.614.3

А. А. Давыденко,
Г. Б. Попов

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ИНТЕРАКТИВНОЙ МОДЕЛИ ЦЕПИ ПОСТАВОК ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование сегодня является общепризнанным инструментом поддержки принятия решений в самых различных областях управления и бизнеса. В статье рассмотрены вопросы проектирования и управления сложными логистическими цепями поставок. Показано влияние таких факторов, как изменчивость и динамика, свойственные этим объектам вследствие сильной зависимости от быстро меняющейся операционной среды, которые обуславливают максимально быстрое построение соответствующих моделей, точнее, их прототипов. Отмечается, что в большинстве случаев проблемы решаются уже на этапе построения прототипа, и в некоторых случаях его создание носит характер постановки задачи и формирования технического задания на полномасштабное моделирование, проблемой которого, в свою очередь, является доказательство адекватности модели. Показано, что наличие прототипа с доказательным поведением в этом случае дает разработчику эффективный инструмент для установления валидности, калибровки и последующего установления адекватности конечного продукта. Наглядно продемонстрировано, что построение прототипа должно использовать максимально простые и эффективные средства, доступные заказчику и постановщику задачи для специалистов по моделированию. В статье описывается предлагаемый для этого подход и обсуждаются результаты его применения.

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, цепи поставок, прототипирование, доказательство адекватности.

Введение

Товародвижение — это процесс, обеспечиваемый системой доставки продукции от производителя до конечного потребителя в точно определённое время с максимально высоким уровнем обслуживания. Качественными показателями этого процесса являются: обеспечение различной партионности отгрузки товара по просьбе покупателя, выбор рационального вида транспорта, содержание оптимального уровня запасов и создание нормальных условий хранения и складирования товаров, а также соблюдение необходимого, заранее оговоренного уровня цен на услуги товародвижения [1]. Указанные показатели имеют также значительное влияние при проектировании и управлении цепями поставок как инструментом, обеспечивающим возможность товародвижения.

В современных условиях одним из важнейших факторов работоспособности предприятия является обеспеченность информационными ресурсами и умение сотрудников предприятия ими оперировать. Своевременная обработка и управление информационными потоками является одной из ключевых задач такого оперирования. Одним из инструментов, позволяющих реализовать данную задачу, является математическое моделирование.

Аналитические информационные технологии подразумевают использование нескольких типов математических моделей, примерами которых являются описательные имитационные модели. Данные модели описывают, каким образом цепь поставки или её часть будет функционировать при изменении ключевых параметров [2], [3].

Выбор среды реализации

В условиях жесткой конкуренции на рынке не все компании имеют возможность приобрести дорогостоящее программное обеспечение (ПО), необходимое для полноценного и качествен-

ного моделирования логистических процессов и цепей поставок. Кроме того, разработка интерактивной модели может потребовать привлечения специалистов в данной области, а также определённых временных и трудозатрат. В некоторых случаях использование такого рода ПО может быть необоснованным, к примеру, из-за простоты моделируемой цепи поставок. Задачей данного исследования является разработка прототипа интерактивной модели цепи поставок посредством общедоступного ПО, не требующего дополнительной подготовки для работы с ним. В результате проведения анализа рынка ПО, подходящего для целей дискретно-событийного моделирования, было выявлено, что большая часть продукции является платной и трудоёмкой в освоении пользователями, не специализирующимися в области информационных технологий. Примерами такого ПО являются пакеты программ «AnyLogic» (The AnyLogic Company), «Arena» (Rockwell Software), «SIMUL8» (SIMUL8 Corporation) [4] – [6]. Необходимо отметить, что указаннное ПО разработано специально для целей имитационного и дискретно-событийного моделирования, поэтому позволяет добиться наиболее качественных результатов. Однако применять данные пакеты приложений при моделировании простых случаев цепей поставок нерационально.

Помимо инструментов, созданных исключительно для целей дискретно-событийного моделирования, имеется ПО общего назначения, подходящее для разработки прототипов интерактивных моделей. К такому ПО относится пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office [7]. Использование входящего в него продукта Microsoft Excel в качестве простейшего инструмента дискретно-событийного моделирования обладает следующими преимуществами [8], [9]:

– отсутствие необходимости в затратах на приобретение дополнительного ПО;

– отсутствие необходимости в дополнительных трудовых и финансовых затратах привлечение специалистов / обучение сотрудников;

– широкая распространённость и относительная простота в использовании.

Использование специализированного ПО целесообразно лишь в случае невозможности работы в данном направлении с помощью ПО общего назначения [10], [11].

Описание прототипа интерактивной модели цепи поставок

Прежде чем приступить к разработке интерактивной модели цепи поставок, необходимо определить, какие ключевые элементы будут в нее непосредственно входить. Предположим, что рассматриваемая цепь поставок состоит из трёх предприятий-производителей продукции, морского порта отправления (порт 1), из которого осуществляется отгрузка груза в морской порт прибытия (порт 2) и дистрибьютора, осуществляющего сбыт продукции различным покупателям. Данная схема приведена на рис. 1.

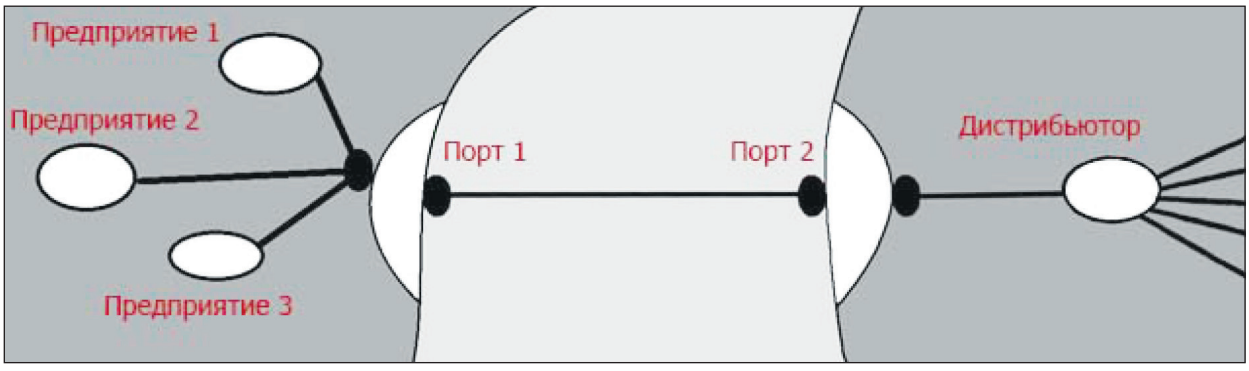


Рис. 1. Пример топологии цепи поставки от производителя до дистрибьютора

Поскольку имеются три предприятия-производителя, необходимо начать описание модели с их производственной программы. Будем считать, что год состоит из 52 недель, разбитых на четыре условных сезона, по 13 недель каждый (традиционные *весна*, *лето*, *осень*, *зима* не равны по продолжительности и в условном рассмотрении неудобны). Программа производства характе-

ризуется сезонной вариативностью K_s, $s = 1 \ldots 4$. Пусть внутри каждого сезона имеется своя вариативность K_w, $w = 1 \ldots 13$ для каждой из 13 недель, составляющих сезон. Наконец, пусть каждая неделя характеризуется вариативностью по дням K_d, $d = 1 \ldots 7$.

Пусть предприятие должно выпустить за год продукцию в некотором заданном количестве Q, ед. продукции. В таком случае выпуск продукции в каждый день года характеризуется величиной

$$P_0[i] = QK[i], \tag{1}$$

где Q — планируемый годовой объем производства, ед. продукции;
$K[i]$ — доля от годового объема продукции выпускаемая в i-й день.

При этом $K[i]$ определяется по следующей формуле:

$$K[i] = K_s K_w K_d, \tag{2}$$

где K_s — сезонная вариативность, %;
K_w — недельная вариативность, %;
K_d — дневная вариативность, %.

Следующим этапом разработки прототипа модели является определение взаимосвязей между элементами предприятия, портом отправления, а также связывающей их транспортной магистралью. Предприятие в данном проекте предполагается состоящим из нескольких функциональным элементов. Первым элементом является производство, которое получает программу $P_0[i]$, $i = 1 \ldots 365$. Если производство в состоянии справиться с программой, то оно выпускает заданное количество продукции:

$$P[i] = P_0[i]. \tag{3}$$

Если производство не в состоянии выпускать продукцию, то $P_0[i] = 0$. В этом случае производственная деятельность предприятия связана потерями $L[i]$, которые условно принимаются равными невыполненному дневному заданию:

$$L[i] = -P_0[i]. \tag{4}$$

Выполнение задания не вызывает потерь, т. е. в этом случае $L[i] = 0$. Из ранее изложенного видно, что потери и продукция описываются, соответственно, состояниями $L[i]$ и $P[i]$, которые отражают деятельность функционального элемента «производство». Элемент «производство», в свою очередь, не в состоянии выпускать продукцию, если переполняется склад, который является следующим функциональным элементом описываемой модели предприятия. Склад каждый день $[i]$ накапливает продукцию $P[i–1]$, произведенную в предыдущий день. Иными словами, состояние склада определяется формулой

$$S[i] = S[i] + P[i–1]. \tag{5}$$

Когда на складе накапливается объем продукции, составляющий транспортную партию T_0, соответствующий объем складированной продукции направляется на грузовой терминал предприятия (если этот терминал свободен, т. е. с него уже вывезена предыдущая транспортная партия). Терминал является еще одним функциональным элементом модели производства. Отправка транспортной партии со склада является единственным механизмом, уменьшающим хранимый на складе запас. Если терминал долго не может отправить транспортную партию, то склад постоянно пополняет запас за счет производимой каждый день продукции вплоть до своего переполнения. Переполнение склада вызывает остановку производства, что, в свою очередь, обуславливает потери. Терминал не может отправить транспортную партию, если на подходах к нему не имеется транспортных средств (например, шесть грузовых автомобилей максимальной грузоподъемностью 20 т каждый, т. е. 120 т в день).

Еще одним функциональным элементом модели является транспорт на подходах к терминалу. Количество транспортных средств $T[i]$ в ожидании подачи на терминал определяет состоя-

ние этого элемента. Если на терминал поступает транспортная партия, то транспортное средство из этой очереди подается на терминал, что уменьшает длину очереди, т. е.

$$T[i+1] = T[i] - 1. \quad (6)$$

Эту длину увеличивает возвращение на терминал транспортного средства, доставившего груз по назначению и проделавшего весь обратный путь. Терминал непосредственно связан с транспортной магистралью, длина которой описывается совокупностью суточных перегонов, или звеньев: D_1, D_2, D_3, … . Если время в пути составляет, к примеру, семь суток, то магистраль состоит из семи звеньев: D_1, D_2, …, D_7.

Звено как функциональный элемент модели работает совсем просто: если на терминале есть готовое транспортной средство, то $D_1[i] = 1$, что реализуется простым присваиванием $D_1[i] = T[i-1]$. Каждое следующее звено работает по правилу $D_2[i] = D_1[i–1]$, $D_3[i] = D_2[i–1]$ и т. д. В общем случае

$$D_n[i] = D_{n-1}[i-1]. \quad (7)$$

В описываемой модели продукция предприятия отгружается в морской порт. Иными словами, последнее звено транспортной магистрали D_N должно передать транспортное средство на предпортовую станцию. Однако этому может препятствовать объявленный запрет (конвенция) на приемку транспортного средства $r[i]$. В этом случае транспортное средство пополняет очередь:

$$q[i] = q[i-1] + 1. \quad (8)$$

Вызвать запрет на прием транспорта может, например, переполнение склада порта. Невозможность разгрузки и, соответственно, возврата транспортного средства на предприятие может вызвать дефицит транспортных средств для вывоза продукции со склада. Склад начнет накапливать запас за счет производимой каждый день продукции вплоть до своего переполнения. Переполнение склада вызывает остановку производства, которая, в свою очередь, влечет за собой потери (данная ситуация была рассмотрена ранее). Наконец, допущенное под разгрузку транспортное средство доставит груз в порт и отправится в обратный путь, следуя по звеньям магистрали в обратном порядке: D_7, D_6, …, D_1. По прибытии на подъездные пути терминала транспортное средство пополнит транспорт на подходах к терминалу.

Обсуждение результатов моделирования

В порт отправления груз поступает с трех производств, как это было рассмотрено ранее. Для наглядности реализации процесса завоза продукции в порт на рис. 2 изображен сводный график завоза со всех трех предприятий.

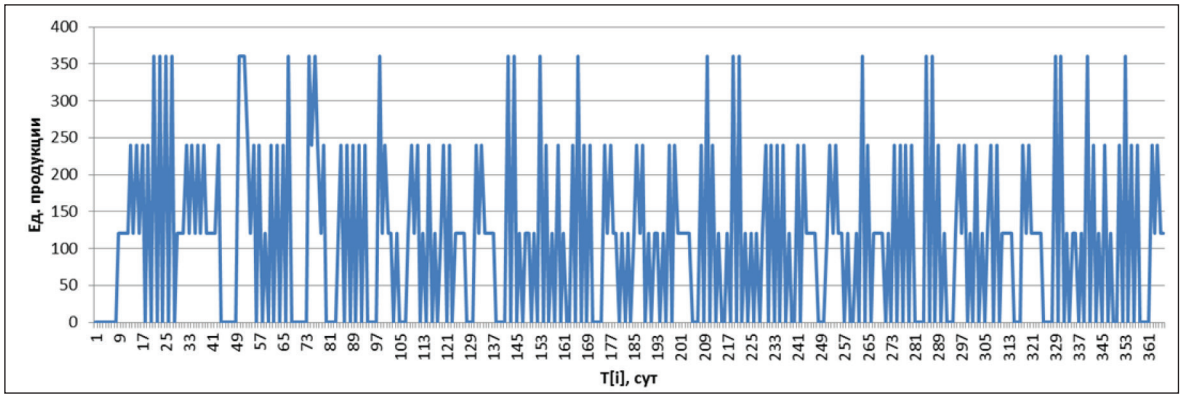


Рис. 2. График завоза груза в морской порт отправления

На рис. 3 приведен график вывоза груза из порта отправления судном грузоподъёмностью 2950 т (судно типа «Волго-Балт», проект № 791) и судном грузоподъёмностью 1000 т (значение

выбрано для сравнения). На основе приведенного графика можно реализовать механизм забора груза из порта отправления судном для перевозки его в порт прибытия. Минимальное требуемое количество судозаходов в год для судна определяется по формуле

$$N_{\text{судозаход}} = \frac{Q_{\text{порт1}}}{Q_{\text{ч}}}, \tag{9}$$

где $Q_{\text{порт1}}$ — количество груза, поступившего в порт 1 за год; $D_{\text{ч}}$ — чистая грузоподъемность судна.

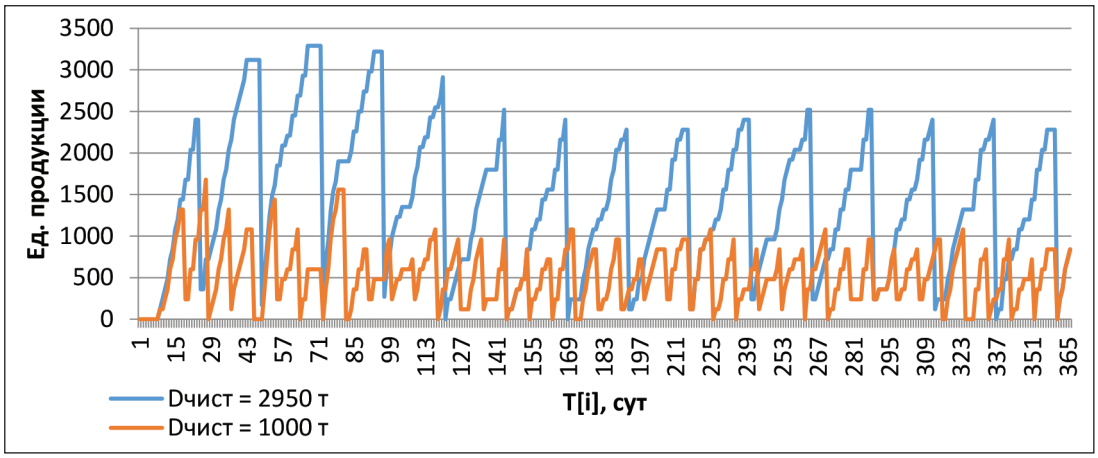


Рис. 3. График вывоза груза из порта отправления

Фактическое количество судозаходов будем определять в виде количества судозаходов, рассчитанного по формуле (9), плюс два судозахода. Для определения периода, через который судно будет заходить в порт, чтобы забрать груз, воспользуемся формулой

$$T_{\text{судозаход}} = \left[\frac{365}{N^{\text{факт}}_{\text{судозаход}}} \right], \tag{10}$$

где $N^{\text{факт}}_{\text{судозаход}}$ — количество фактических судозаходов в порт отправления.

Заход судна в порт задается с помощью определения кратности номера дня периоду захода судна, т. е. если $[i]$ кратно $T_{\text{судозаход}}$, то будет осуществляться судозаход. Вывозиться при этом будет количество груза, накопленное в порту к этому моменту, т. е. количество груза в $[i - 1]$-й день. В этот день количество груза в порту отправления будет равно нулю. После того как судно вышло из порта, будет снова осуществляться накапливание груза в порту отправления. Как видно из рис. 3, чем меньше грузоподъёмность судна, тем больше количество судозаходов и тем меньше вывозимая партия груза, что подтверждает адекватность поведения модели.

Далее необходимо рассчитать, в какой день $[i + k]$ судно будет осуществлять заход в порт прибытия, т. е. сформировать расписание движения судов (дата выхода судна из порта 1 уже известна). Значение $[k]$ задаётся произвольно в зависимости от конкретной моделируемой ситуации. Для примера зададим $[k] = 10$. Тогда судно, заходя в порт 1 каждый 24-й день, т. е. при $[i] = 24$, $[i] = 48$, $[i] = 72$ и т. д., будет заходить в порт 2 через 10 дней, т. е. в моменты $[i] = 34$, $[i] = 58$, $[i] = 82$ и т. д.

С целью упрощения будем считать, что единственным способом пополнения склада порта 2 является заход и выгрузка судна, пришедшего из порта 1. При этом единственным способом уменьшения количества груза на складе порта прибытия является вывоз его транспортными средствами и доставка до получателя. Доставка до получателя, в свою очередь, осуществляется по транспортной магистрали, принцип работы которой был рассмотрен ранее при описании вывоза груза со склада производителя.

Для описания деятельности порта 2 по приёму груза введём понятия: *остаток на начало дня для склада и остаток на конец дня для склада*. Остаток на начало дня ($G_{\text{нач}}[i]$) отражает выгрузку

груза с судна ($Q_c[i]$) на склад, остаток на конец дня ($G_{кон}[i]$) показывает, сколько груза осталось на складе порта 2 после вывоза продукции наземным транспортом в адрес получателя. Транспортную партию, $q[i]$, как и ранее, примем равной 120 т (колонна из шести грузовых автомобилей, загрузкой по 20 т каждый). При переполнении склада порта прибытия выгрузка с судна становится невозможной, поэтому груз остаётся на судне и возникает остаток груза на судне. До тех пор, пока остаток груза на судне ($z[i]$) не будет выгружен, судно не может покинуть порт. Каждый лишний день, проведенный под выгрузкой сверх сталийного времени, приносит расходы в виде демереджа. Из-за того, что партия груза, прибывшая на судне, может быть выгружена не вся по причине переполнения склада, необходимо ввести еще одну величину — *количество груза, поступившего на склад* ($g[i]$). Математически описать зависимости между этими величинами можно следующим образом:

$$G_{нач}[i] = G_{кон}[i-1] + g[i]; \tag{11}$$

$$G_{кон}[i] = G_{нач}[i] - g[i]; \tag{12}$$

$$z[i] = Q_c[i] - g[i] + z[i-1], \tag{13}$$

где $g[i]$ либо приравнивается к $z[i]$, в случае, если $z[i]$ помещается на склад, т. е. если $z[i]$ меньше разницы между емкостью склада порта 2 и остатком на конец предыдущего дня ($G_{кон}[i]$), либо считается равным разнице между емкостью склада порта 2 и $G_{кон}[i]$ в обратном случае.

На рис. 4 приведен график, описывающий ситуацию в порту прибытия. В разрабатываемом прототипе модели получатель груза является дистрибьютором, который накапливает на своём складе достаточную для продажи партию реализации P_r, а затем находит разных покупателей и сбывает им эту партию груза. Условимся, что для поиска, продажи и вывоза продукции в общем случае дистрибьютору необходимо определённое число суток, т. е. время на реализацию продукции (t_r). При этом количество груза на складе дистрибьютора $Q_д[i]$ определяется по формуле

$$Q_д[i] = Q_д[i-1] + q_д[i] - p_r[i], \tag{14}$$

где $q_д[i]$ — количество груза, поступившего на склад дистрибьютора в $[i]$-й день; $p_r[i]$ — количество груза, реализованного в $[i]$-й день.

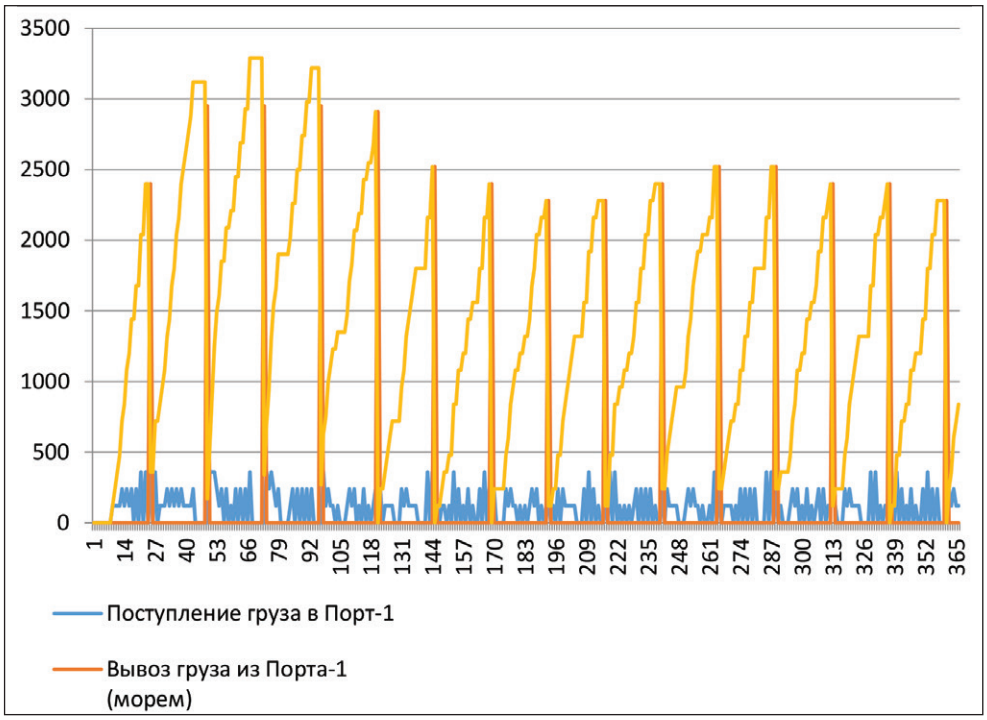


Рис. 4. График динамики поведения подсистемы *морской транспорт — порт прибытия — дистрибьютор*

В [i]-й день на склад поступает $q_д$ [i] т груза, привезенного из порта 2; в [i+1]-й день на склад поступает $q_д$ [i+1] т груза и т. д. Значение $Q_д$ при этом постоянно растёт. Когда $Q_д$ [i] становится равным P_r, начинается отсчёт дней, необходимых для реализации (t_r). В момент времени [$i + t_r$] вся партия реализации P_r считается проданной, т. е. $p_r[i + t_r] = P_r$. При $t_r = 0$ сут продукция реализуется в тот же день, когда на складе накапливается достаточная для реализации партия. Такой механизм, позволяющий оценить ситуацию при реализации продукции в общей форме, показан на рис. 5.

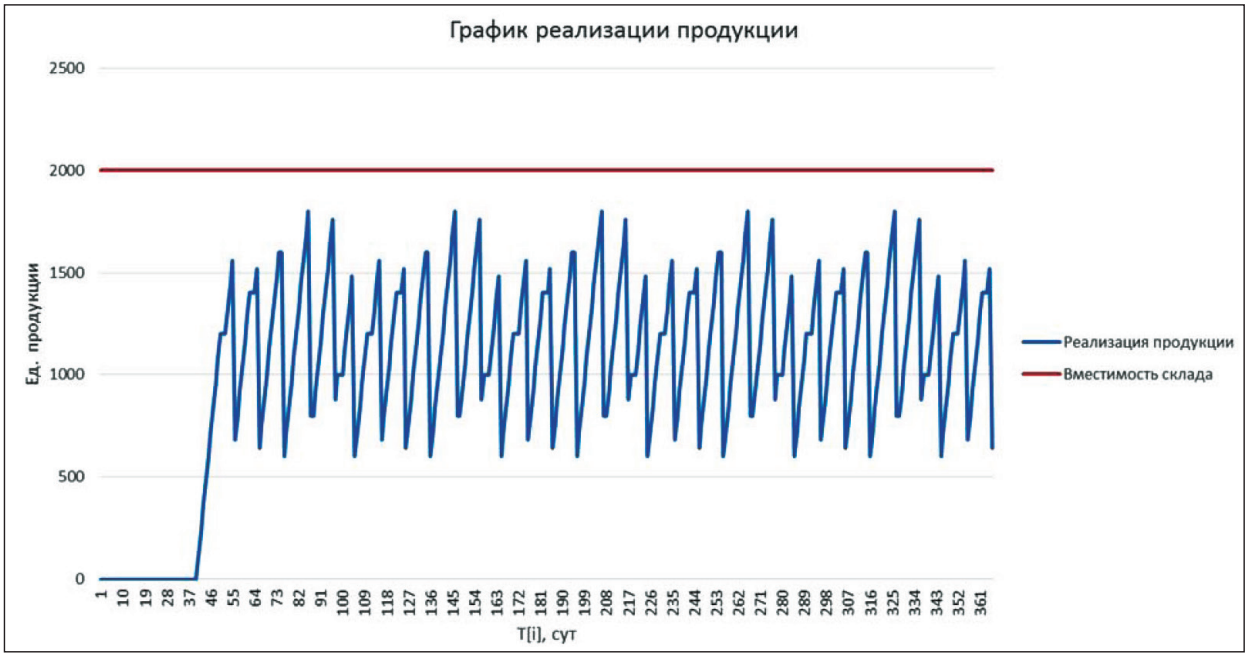


Рис. 5. График реализации продукции дистрибьютором

Выводы

1. Описан прототип интерактивной модели цепи поставок, позволяющий оценить количественные показатели работы цепи поставок при введении определённых исходных данных.

2. Реализация прототипа базируется на использовании простых алгоритмов и математических выражений, что позволяет анализировать поведение системы и проводить «бэктрейсинг» (разбор хода процесса).

3. В случае необходимости выявить «узкие места» цепи или быстро принять управленческое решение использование прототипа интерактивной модели можно считать вполне оправданным.

4. Для решения более сложных задач и достоверного моделирования цепи поставок необходима реализация модели на платформе соответствующего ПО и привлечение специалистов в области информационных технологий и моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юдакова О. В.* Методы для оценки эффективности маркетинговых решений / О. В. Юдакова // Экономические науки. — 2011. — № 77. — С. 82–86.

2. *Бочкарев А. А.* Планирование и моделирование цепи поставок / А. А. Бочкарев. — М.: Альфа-Пресс, 2008. — 192 с.

3. *Grigoryev I.* AnyLogic 7 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling / I. Grigoryev. — 2 ed. — United States: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. — 256 p.

4. *Кузнецов А. Л.* Генезис агентного имитационного моделирования в ходе развития методов технологического проектирования портов и терминалов / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 4. — С. 3–7.

5. *Кузнецов А. Л.* Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 33–42.

6. Excel 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://products.office.com/ru-ru/excel (дата обращения – 24.02.2016).

7. *Law A. M.* Simulation Modeling & Analysis / A. M. Law. — McGraw-Hill, 2007. — 768 p.

8. *Kelton W. D.* Simulation with Arena / W. D. Kelton, R. Sadowski, N. Zupick. — 6th ed. — McGraw-Hill Education, 2014. — 656 p.

9. *Barlow J F.* Excel Models for Business and Operations Management / J. F. Barlow. — England: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. — 415 p.

10. *Kuznetsov A.* Simulation for assessment of the interface between port traffic and dredging activity / A. Kuznetsov, A. Keizer // Proceedings of the 15th International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelSta'15), 21–24 October 2015. — Riga, Latvia, 2015. — P. 41.

11. *Кузнецов А. Л.* Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16.

DEVELOPMENT OF A SUPPLY CHAIN INTERACTIVE MODEL PROTOTYPE BY MEANS OF DISCRETE-EVENT SIMULATION

Simulation today is a widely acknowledged instrument for supporting of the decision-making processes in many fields of management and business. The design and control of logistic supply chains is not an exemption. In the same time, volatility and dynamics of these objects caused by quickly changing outer operational environment put forward a task of very short model' development cycle, specifically prototyping of models. In many cases, the solutions for the problems could be found already in the prototype development process. In other cases, the prototype plays a role of technical specification and goal setting for simulation. The adequacy of the model usually is a big question. The existence of a prototype provides an effective tool for validation, calibration and adequacy proof of the model. In any cases, the development of the prototype needs the simplest and efficient means, available and easy handled by the customer of the simulation. The paper describes an approach for this and discusses the results of its application.

Keywords: simulation modelling, discrete-event simulation, supply chains, prototyping, adequacy proof.

REFERENCES

1. Judakova, O. V. "Metody dlja ocenki jeffektivnosti marketingovyh reshenij." *Economic sciences* 77 (2011): 82–86.

2. Bochkarev, A. A. *Planirovanie i modelirovanie cepi postavok*. M.: Alfa-Press, 2008.

3. Grigoryev I. *AnyLogic 7 in Three Days: A Quick Course in Simulation Modeling.* 2d ed. United States: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.

4. Kuznetsov, A. L. "Genesis of the agent simulation in development of methods of technological design of ports and terminals." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2009): 3–7.

5. Kuznetsov, Alexander Lvovitch, Sergei Sergeyevich Pavlenko, and Victoria Nickolaevna Scherbackova-Slysarenko. "Container distribution networks modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 33–42.

6. Excel 2016. Web. 24 Feb. 2016 <https://products.office.com/ru-ru/excel>.

7. Law A. M. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill, 2007.

8. Kelton, W. D., R. Sadowski, and N. Zupick. *Simulation with Arena*. 6th ed. McGraw-Hill Education, 2014.

9. Barlow, J. F. *Excel Models for Business and Operations Management*. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

10. Kuznetsov, A., and A. Keizer. "Simulation for assessment of the interface between port traffic and dredging activity." *Proceedings of the 15th International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelSta'15), 21-24 October 2015.* Riga, Latvia, 2015: 41.

11. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): С. 7–16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыденко Александр Александрович — кандидат экономических наук.
Федеральное агентство морского и речного транспорта
kaf_pgt@gumrf.ru
Попов Герман Борисович — аспирант.
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович — доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
german_bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydenko Aleksandr Aleksandrovich — PhD.
Federal Agency of Sea and Inland Water Transport
kaf_pgt@gumrf.ru
Popov German Borisovich — postgraduate.
Supervisor:
Kuznetsov Aleksandr Lvovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
german_bp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 мая 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-15-22
УДК 655.62.052.4

А. А. Ершов

СПОСОБЫ ВЫЖИВАНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ АВАРИЯХ

В статье рассматриваются способы выживания пассажиров и членов экипажа при морских и речных авариях судов. Отмечается, что большое число погибших при таких авариях членов экипажа, как в случае гибели российского теплохода «Булгария», китайского судна «Звезда Востока», итальянского лайнера «Costa Concordia» и южнокорейского парома «Sewol», объясняется в том числе тем, что людям, находящимся на борту и спасателям, не были известны закономерности опрокидывания судна и способы выживания, определяемые условиями, при которых находиться на борту терпящего бедствие судна крайне опасно. Отмечается, что людям на борту не были известны конкретные условия, при которых судно неизбежно опрокидывается, и способы определения этих условий на борту судна, чтобы успеть своевременно покинуть его. В статье предлагаются практические способы выживания, основанные на закономерностях потери остойчивости судна, которые позволят всем находящимся на борту своевременного обнаружить опасность гибели судна и безопасно покинуть его перед опрокидыванием.

Ключевые слова: опрокидывание морских и речных судов, способы выживания людей при морских и речных авариях.

Введение

Анализ гибели судов, приведших к человеческим жертвам, показывает, что значительная часть этих катастроф происходила в узкостях или в непосредственной близости от берега. К последним крупным морским авариям, связанным с гибелью судов в таких условиях. можно отнести опрокидывание лайнера «Costa Concordia» в 2012 г. и южнокорейского парома «Sewol» в 2014 г. Крупнейшей речной аварией, сопровождавшейся гибелью большого количества пассажиров и членов экипажа, явилась катастрофа российского судна «Булгария» в 2011 г. и китайского судна «Звезда Востока», произошедшая в 2015 г. Анализ этих и других аварий также показал, что значительная часть морских и речных катастроф, связанных с гибелью людей, происходит в штормовых условиях [1] – [3].

Задачи, связанные с обеспечением безопасности судов в узкостях и при подходах к портам, решались в работах [4] – [9]. К последним работам, связанным с обеспечением безопасности штормового плавания, можно отнести [10], [11]. Тем не менее, от каких бы причин ни зависела и в каких бы условиях ни происходила гибель судна, причиной является потеря его остойчивости и плавучести. Причем в этом случае наибольшую опасность представляет потеря поперечной остойчивости судна, так как она наиболее быстро приводит к опрокидыванию и гибели судна.

Основная часть

Потеря остойчивости и появление статического крена судна являются наиболее частыми факторами, сопровождающими катастрофы морских судов. Крупнейшие катастрофы морских судов, такие как гибель лайнера «Costa Concordia» и южнокорейского парома «Sewol» сопровождались длительным по времени нарастанием крена и последующим опрокидыванием судна, приведшим к гибели большого числа пассажиров и членов экипажа [1], [2]. Большое количество жертв в результате этих и других аварий морских и речных судов объясняется тем, что люди на борту (пассажиры и члены экипажа) не имели представления о времени и признаках приближающего опрокидывания судна при накренении, они не осознавали приближающейся опасности гибели судна и оставались на местах в своих каютах, коридорах или других судовых помещениях в ожидании дополнительной информации от экипажа судна. Так, при гибели корейского парома «Sewol» 304 подростка оставались в своих каютах или коридорах при опрокидывании судна, что впоследствии привело к трагедии.

В условиях морской или речной аварии оперативная информация о возможности опрокидывания судна и, следовательно, о том, что находящимся на борту людям необходимо немедленно покинуть судно, может стать единственным залогом их успешного спасения. Эти сведения, которые должны быть известны всем находящимся на борту людям, могут предотвратить их гибель в результате подобных морских и речных аварий. Поэтому всем находящимся на борту людям должна быть предоставлена информация *об опасности опрокидывания судна*. При этом они должны иметь возможность *воспользоваться информацией о возможности опрокидывания судна* в условиях темноты, задымления или пожара, которые могут сопровождать опрокидывание судна при аварии. Для решения этой задачи может быть использована следующая схема подготовки любого члена экипажа или пассажиров судна к аварии.

Как известно из теории, каждое судно имеет свои параметры остойчивости в зависимости от геометрии, конструкции и характера загрузки. При медленном нарастании крена судна при аварии эти параметры определяются путем расчета диаграммы статической остойчивости (ДСО), которая имеет вид, приведенный на рис. 1. На ДСО при статическом накренении судна под действием внешнего кренящего момента существуют *зоны устойчивого и неустойчивого равновесия судна*. Зона устойчивого равновесия является зоной углов крена судна безопасного спрямления и предотвращения опрокидывания судна. Как показывает анализ приведенных ранее и других аварий, подобная информация о нахождении опрокидывающегося судна в зоне устойчивого равновесия может стать единственной возможностью для спасения пассажиров и экипажа судна.

Диаграмма статической остойчивости судна (ДСО) — это графическая зависимость плеча восстанавливающего момента $l(\theta)$ или, согласно международным обозначениям $GZ(\theta)$, зависимость от угла крена судна θ. Этот график, как правило, изображают для крена судна на правый борт, поскольку при крене на левый борт для симметрично загруженного судна ДСО будет аналогична [3].

ДСО строится для конкретного судна и соответствует определенным значениям водоизмещения и положения центра тяжести (ЦТ) по высоте. Если у данного судна изменится водоизмещение P или аппликата ЦТ, то ДСО приобретет другой вид. Каждое судно должно иметь информацию об остойчивости и комплект информации для капитана, позволяющие рассчитать ДСО для любых вариантов нагрузки. Значение ДСО для судна очень велико, поскольку это не только определённая графическая зависимость, но и информация о состоянии судна с точки зрения статической остойчивости при различных углах крена. ДСО является основным документом, дающим разрешение судну выходить в рейс и позволяющим решать многие практические задачи в рейсе.

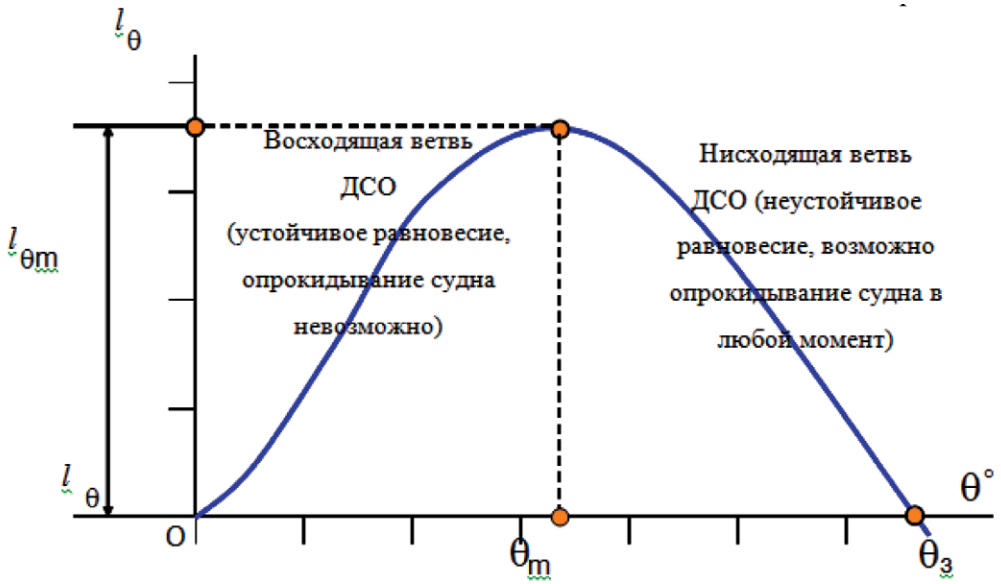


Рис. 1. Возможность опрокидывания на различных ветвях ДСО

ДСО имеет вид кривой с ярко выраженным максимумом, разделяющим восходящую и нисходящую ветвь ДСО (см. рис. 1). На ней можно отметить три точки, характерные для судна, обладающего положительной остойчивостью: точку О (начало координат), определяющую положение устойчивого равновесия; точку θ_m, где плечо статической остойчивости $l(\theta) = l_{\theta m}$ имеет максимальные значения, и точку $\theta_з$, определяющую так называемый угол заката ДСО. По существующим требованиям, угол максимума ДСО должен быть не менее 30 ° ($\theta_m \geq 30$ °), а угол заката — не менее 60 ° ($\theta_з \geq 60$ °). Для практических целей может быть получена зависимость восстанавливающего момента от угла крена судна:

$$M_в(\theta) = P \cdot l(\theta) = P \cdot GZ(\theta) = m_\theta(\theta),$$

где $M_в(\theta)$, $m_\theta(\theta)$ — восстанавливающий момент, характеризующий способность судна возвращаться в первоначальное положение при накренении, кН·м; P — весовое водоизмещение (вес) судна, кН.

В этом случае ДСО будет построена в моментах $M_в(\theta)$, $m_\theta(\theta)$, что удобно для использования судоводителями при решении практических задач.

Как следует из теории статической остойчивости, судно находится в положении устойчивого равновесия только на восходящей ветви ДСО (рис. 2). На нисходящей ветви ДСО (см. рис. 1) судно находится в положении неустойчивого равновесия. При нарастании кренящего момента судно, находящееся на нисходящей ветви ДСО, неизбежно опрокидывается [3]. Положение судна различных ветвях ДСО при опрокидывании непосредственно связано с входом палубы в воду или оголением скулы судна [1] – [3].

Из указанных закономерностей положения судна при опрокидывании необходимо дать практические рекомендации, которые должны быть известны всем находящимся на борту людям (пассажирам и членам экипажа). Они основаны на анализе возможности перемещения любого человека внутри корпуса судна по палубам и коридорам, параллельным длине судна, и связаны с опасностью опрокидывания судна. При этом в качестве основного ориентира любой человек может использовать собственное положение относительно продольного коридора внутри судна и возможность перемещения его по данному пространству с опорой на имеющиеся палубу и переборки коридора.

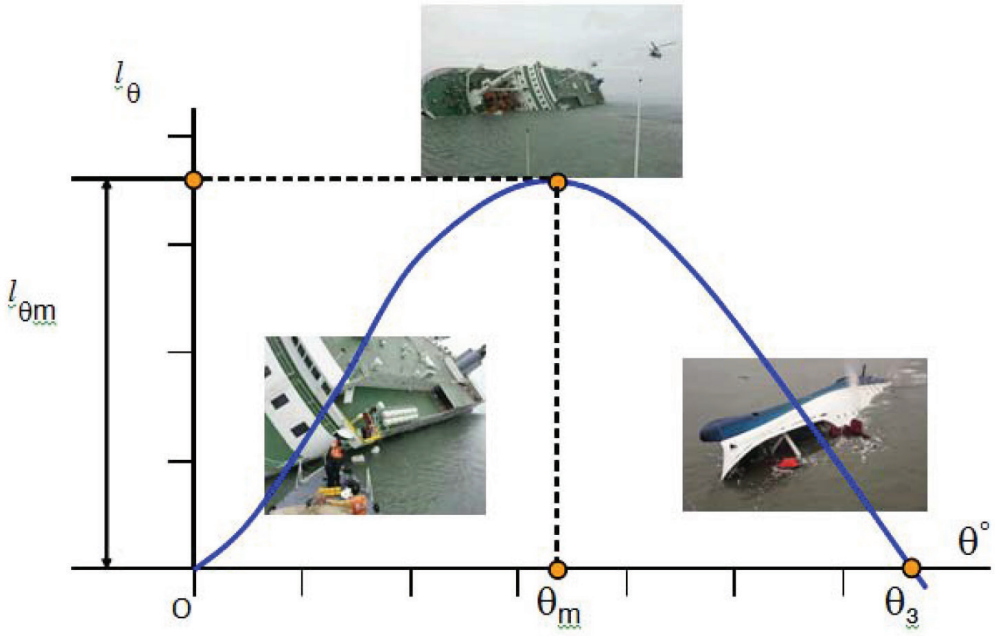


Рис. 2. Положение судна на различных ветвях ДСО при опрокидывании

Преимуществом предлагаемого подхода является то, что человеку не обязательно видеть окружающее пространство коридора, по которому он перемещается, он может ориентироваться только на положение своих рук и ног в условиях различных углов крена судна, при этом для опоры ног используется палуба, для опоры рук — поручень переборки (рис. 3). Этот прием служит для любого человека, находящегося на борту судна, ценной для спасения информацией, которая не зависит от таких факторов, как наличие освещения, задымленности, посторонних предметов, людей и т. п.

В приведенном на рис. 3 обосновании предлагаемых способов выживания людей при авариях морских и речных судов показаны способы, основанные на оценке положения тела и возможностей опоры для человека, который перемещается по продольному коридору накреняющегося судна с различными углами крена, и сравнении этих углов крена с соответствующими участками ДСО судна. Соответствующие рекомендации по безопасному спасению (выживанию) людей судна зависят от положения судна в зонах устойчивого (см. рис. 3 *а – в*) и неустойчивого равновесия судна (см. рис. 3 *г, д*).

При снижении остойчивости судна в условиях повреждения корпуса, попадании воды внутрь и образовании свободных поверхностей угол, соответствующий максимуму ДСО, снижается, а, следовательно, уменьшается и зона устойчивого равновесия по сравнению с неповрежденным судном [2], [3] и происходит снижение диапазона углов крена устойчивого равновесия судна (восходящей ветви ДСО судна). Таким образом, при любой аварии, связанной с попаданием воды внутрь корпуса судна, следование предлагаемым в настоящей работе рекомендациям по выживанию людей является особенно актуальным для всех людей, находящихся на борту опрокидывающегося судна.

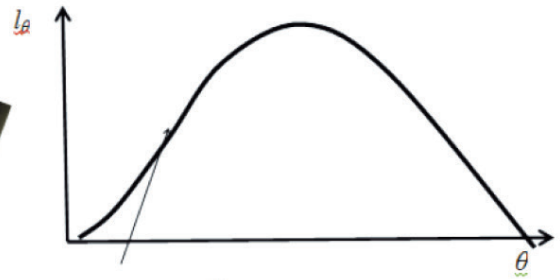
Общий способ выживания людей на борту терпящего бедствие судна, который следует из приведенных на рис. 3 примеров ситуаций, может быть сформулирован следующим образом: *когда по переборкам продольных коридоров накреняющегося судна человеку становится удобнее ходить, чем по их палубе, — судно следует покидать НЕМЕДЛЕННО всем находящимся на борту.*

Предлагаемые в настоящей статье способы выживания людей, находящихся на борту опрокидывающегося судна при аварии, могут быть включены в программу подготовку членов экипажа и инструктирование пассажиров на борту судна.

а)

Угол крена судна 20 градусов.
При движении человека по продольному коридору внутри судна
используется для опоры ног - палуба, для опоры руки - поручень переборки



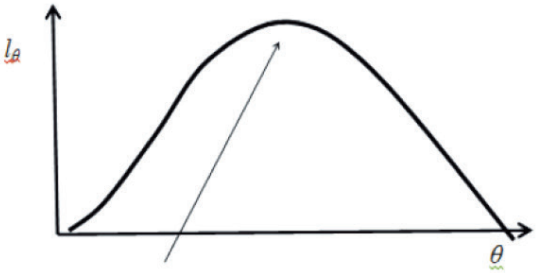


Судно находится в устойчивом положении равновесия.
Опрокидывание судна невозможно.
Можно предпринимать меры по выравниванию крена, выводу людей к спасательным средствам, готовиться к оставлению судна

б)

Угол крена судна 30 градусов
При движении человека по продольному коридору внутри судна
используется для опоры ног палуба (угол между переборкой и палубой), для опоры обоих рук – одна переборка



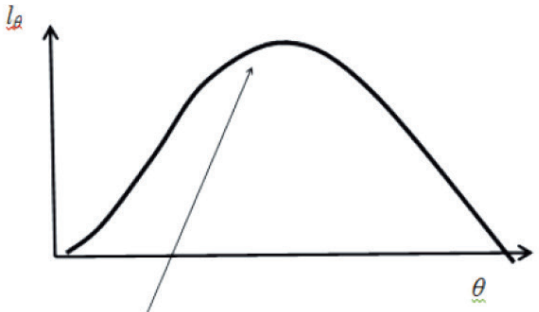


Судно приближается к углу максимума ДСО. Возможно опрокидывание в ближайшее время. Необходимо выводить людей к спасательным средствам, готовиться к оставлению судна

в)

Угол крена судна 45 градусов
При движении человека по продольному коридору внутри судна
используется для опоры рук и ног палуба и обе переборки



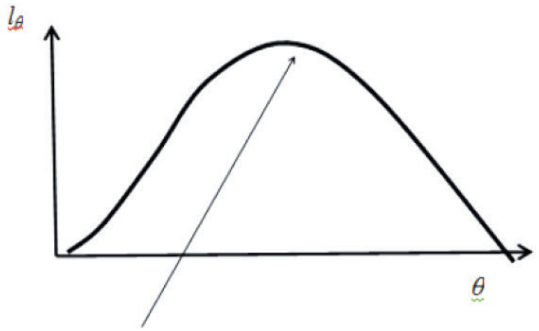


Судно находится у максимума ДСО. Возможно опрокидывание в ближайшее время. Необходимо срочно выводить людей к спасательным средствам, готовиться к оставлению судна

г)

Угол крена судна 60 градусов
При движении человека по продольному коридору внутри судна
используется для опоры ног переборка и для опоры рук палуба и переборки



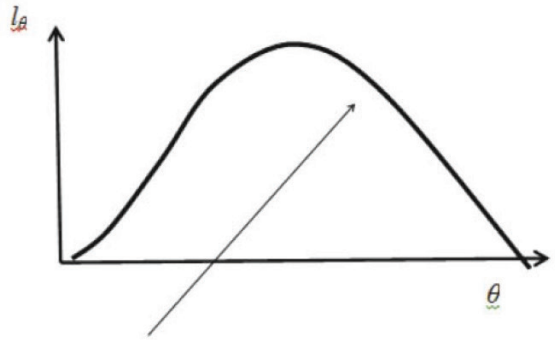


Судно находится у максимума ДСО. Возможно опрокидывание в любой момент. Необходимо срочно выводить людей к спасательным средствам, готовиться к немедленному оставлению судна

д)

Угол крена судна 70 градусов
При движении человека по продольному коридору внутри судна
используется для опоры ног переборка и для опоры рук палуба и потолок





Судно находится за максимумом ДСО. Гарантировано опрокидывание судна в любой ближайший момент. Необходимо срочно выводить людей, готовиться к немедленному оставлению судна любым способом

Рис. 3. Способы выживания людей при опрокидывании судна: *а* — угол крена судна 20 °; *б* — угол крена судна 30 °; *в* — угол крена судна 45 °; *г* — угол крена судна 60 °; *д* — угол крена судна 70 °

Выводы

1. Большое число погибших при авариях морских и речных судов часто объясняется тем, что люди на борту (пассажиры и члены экипажа) не имели представления о времени и признаках приближающегося опрокидывания судна при накренении и способах выживания, которые должны быть известны всем находящимся на борту судна.

2. Предлагаемые в настоящей статье способы выживания на борту судна основаны на оценке положения тела и возможностей опоры для человека, который перемещается по продольному коридору накреняющегося судна.

3. Предлагаемой информацией о возможности опрокидывания судна и способах выживания людей на борту можно воспользоваться в условиях темноты, задымления или пожара, которые могут сопровождать опрокидывание судна при аварии.

4. Рассмотренные в настоящей статье способы выживания людей, находящихся на борту опрокидывающегося судна при аварии, могут быть включены в программу подготовку членов экипажа и инструктирование пассажиров на борту судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.

2. *Ершов А. А.* Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.

3. *Ершов А. А.* Теория судна. Статика: учебник / А. А. Ершов, Б. П. Коротков, Г. Т. Милькин, М. С. Овсянников. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 186 с.

4. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

5. *Астерин В. В.* Принципы координации подсистем судна для предупреждения столкновений / В. В. Астерин, Е. В. Хекерт // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 13–22.

6. *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.

7. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

8. *Некрасов С. Н.* Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

9. *Ершов А. А.* Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях / А. А. Ершов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. — 2014. — С. 6–13.

10. *Ершов А. А.* Совершенствование методов обеспечения безопасности штормового плавания судов / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 7–13.

11. *Ершов А. А*. Практический способ определения параметрического резонанса по бортовой качке судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С.18–25.

THE WAYS OF SURVIVAL OF PEOPLE IN SEA AND RIVER ACCIDENTS

The article discusses ways of survival of passengers and crew members in sea and river vessel accidents. A large number of victims in such accidents as the the Russian vessel "Bulgaria", Chinese ship "Star of the East", the Italian liner "Costa Concordia" and the South Korean ferry "Sewol" can also be explained by the fact that to people aboard and the rescuers were not known to the laws of capsizing the vessel and survival techniques that define the conditions under which it is to stay on board of the vessel is extremely dangerous. The people on board were not aware of specific conditions under which the ship is inevitably overturned and the ways to determine these conditions on board the ship in time to leave. The article offers practical survival techniques based on patterns of loss of stability of the vessel that will allow all aboard to detect timely the risk of loss of the vessel and safely to leave it.

Keywords: rollover of sea and river vessels, the ways of survival of people in sea and river accidents.

REFERENCES

1. Ershov, A. A. *Ot «Titanika»* do «Costa Concordia» *neispolzovannye vozmozhnosti dlja spasenija: monografija*. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013: 146.

2. Ershov A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.

3. Ershov, A. A., B. P. Korotkov, G. T. Milkin, and M. S. Ovsjannikov. *Teorija sudna. Statika: uchebnik*. — SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009.

4. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

5. Asterin, V. V., and E. V. Hekert. "Vessel subsystems coordination principles for collision avoidance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 13–22.

6. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "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.

7. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.

8. Nekrasov, S. N., Efimov K. I., and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.

9. Ershov, A. A. "Usage zones of safe passage in approaches to ports and inland waterways." *Sb. nauch. tr. prof.-prep. sost. GUMRF im. adm. S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014: 6–13.

10. Ershov, Andrey Aleksandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. "Improvement of the methods of ensuring safety of storm navigation of the ships." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 7–13.

11. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. "Practical method for determining the parametric resonance of rolling of the vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 18–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ershov Andrey Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-23-29
УДК 656.61.052

Э. Н. Пятаков,
С. В. Копанский,
Е. Л. Волков

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ БИНАРНОЙ КООРДИНАЦИИ ПРИ РАСХОЖДЕНИИ СУДОВ

Анализируется ситуация опасного сближения двух судов, характеризующаяся ситуационным возмущением, значение которого зависит от соотношения дистанции кратчайшего сближения и предельно-допустимой дистанции. Причем ситуационное возмущение может принимать значение, равное единице, при котором расхождение производится стандартным маневрированием, и значение, равное двум, которое требует использования маневра экстренного расхождения. Рассмотренная система бинарной координации учитывает требование закона необходимого разнообразия Эшби, который предусматривает соответствие разнообразия имеющихся курсов уклонения разнообразию возможных опасных курсов сближения. Показано, что это требование выполняется при компенсации ситуационного возмущения либо одновременным маневром обоих судов, либо маневром судна с большей скоростью. Система бинарной координации, которая предложена в статье, содержит два уровня. Первый из них реализуется, когда ситуационное возмущение принимает значение, равное единице, и взаимные обязанности судов определяются с учетом соотношения статусов и скоростей. При значении ситуационного возмущения, равного двойке, имеет место второй уровень и предусмотрено экстренное маневрирование обоих судов. При сближении двух судов с одинаковыми статусами и скоростями их взаимные обязанности определяются тем, являются ли их курсы сближения встречными или попутными.

Ключевые слова: предупреждение столкновения судов, ситуационное возмущение, система бинарной координации, закон необходимого разнообразия.

Введение

Обеспечение безопасного расхождения судов в случае возникновения угрозы их столкновения является одной из наиболее актуальных проблем безопасности судовождения. При возникновении ситуационного возмущения суда должны компенсировать его путем выполнения маневра расхождения. При этом, как правило, маневры расхождения судов должны быть согласованы с помощью системы бинарной координации, структура которой требует подробного исследования, которому и посвящена настоящая статья.

Структура Международных правил предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72) в части маневрирования при расхождении и применение системы бинарной координации, реализованной в них, рассмотрены в работе [1], публикация [2] посвящена вопросам управления группой судов в ситуации опасного сближения. Формальное описание системы бинарной координации МППСС-72 содержится в работе [3], которое получило дальнейшее обобщение в виде одного из возможных вариантов координации взаимодействия трех опасно сближающихся судов, изложенного в публикации [4]. Процедура выбора безопасного маневра расхождения изменением курсов судов рассмотрена в работе [5], а использованию области опасных курсов для предупреждения столкновения пары судов при внешнем управлении посвящены работы [6], [7]. Расхождение нескольких судов в ситуации опасного сближения изменением курса при внешнем типе управления изложено в работах [8], [9]. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения описана в работе [10], а в работе [11] рассмотрены вопросы маневрирования при чрезмерном сближении судов на попутных курсах. Математическая модель расхождения с судами смещением на параллельную линию пути предложена в работе [12].

В общем случае модель формализации МППСС-72 [1], [3] учитывает начальную относительную позицию судна и цели, а также их параметры движения. Выходом модели МППСС-72 являются логические переменные, определяющие возможность изменения курса вправо и влево

и требование уступать дорогу или сохранять параметры движения. В модели принимаются неизменные параметры движения целей и заданные допустимые дистанции кратчайшего сближения с каждым судном. Неопределенности, содержащиеся в МППСС-72 при опасном сближении судов, рассмотрены в работе [13]. Поэтому следует рассмотреть модель бинарной координации, которая свободна от недостатков МППСС-72, приведенных в последней работе.

Целью данной статьи является определение структуры системы бинарной координации маневров расхождения опасно сближающихся судов, свободной от неопределенностей в случае ее применения.

Основная часть

Система бинарной координации $c_0(Bz)$ является средством для описания тенденции поведения пары взаимодействующих судов при возникновении ситуационного возмущения с целью его компенсации. Первой характеристикой ситуационного возмущения является его значение ω, возникающее при прогнозируемом попадании судов в область недопустимых позиций, которое выявляет грядущую опасную позицию заблаговременно, исходя из прогноза изменения относительной позиции пары судов. Поэтому оно носит условный характер, так как на его истинность влияют возможные действия судов и способ прогноза. Следовательно, ситуационное возмущение ω возникает тогда, когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения $D_{\min}$ меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения D_d, величина которой зависит от формы области недопустимых позиций и ракурса сближения судов.

Второй характеристикой ситуационного возмущения является время запаса t_{Z1} и t_{Z2} для каждого из пары судов. Смысл времени запаса заключается в следующем. Если при наличии ситуационного возмущения дистанция между судами превосходит значение D_d и судно может своим маневром обеспечить максимальное значение дистанции кратчайшего сближения max $D_{\min}$, для которого max $D_{\min} > D_d$, то суда находятся в допустимой позиции. С течением времени дистанция между судами сокращается, и наступает момент времени t_{di}, когда достигается равенство max $D_{\min} = D_d$. При дальнейшем сближении судов с программными параметрами движения max $D_{\min} < D_d$ судно с меньшей скоростью попадает в подмножество недопустимых позиций, причем никаким маневром оно не сможет разойтись с другим судном в дистанции D_d. Поэтому время запаса t_{Z1} равно интервалу времени от текущего момента до момента времени t_{di} попадания судна в подмножество недопустимых позиций. Значение времени запаса t_{Z12} для пары судов целесообразно выбирать из соотношения $t_{Z12} = \min(t_{Z1}, t_{Z2})$.

Ситуационное возмущение ω может принимать три значения:

$$\omega = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d; \\ 1, & D_{\min} \le D_d, t_{z12} > 0; \\ 2, & D_{\min} \le D_d, t_{z12} \le 0. \end{cases}$$

В качестве маневра расхождения рассмотрим маневр изменения курса судна. Очевидно, система $c_o(Bz)$ состоит из двух частей в зависимости от реализованного значения ситуационного возмущения ω. Вначале рассмотрим ситуацию, когда ω = 1. Прежде всего, система бинарной координации $c_o(Bz)$ должна удовлетворять закону необходимого разнообразия Эшби [14], согласно которому разнообразие имеющихся стратегий расхождения должно соответствовать разнообразию возможных ситуационных возмущений. В противном случае система $c_o(Bz)$ не сумеет компенсировать ситуационные возмущения, создавая предпосылки для столкновений судов. В нашем случае это значит, что система $c_o(Bz)$ должна располагать потенциальной возможностью компенсации ситуационного возмущения во всех случаях при ω = 1.

С одной стороны, ситуационное возмущение характеризуется множеством недопустимых относительных курсов M_d, при которых существует опасность столкновения, а с другой — система бинарной координации $c_o(Bz)$ имеет возможность сформировать множество безопасных относительных курсов M_s. Опасность столкновения будет предупреждена и ситуационное возмущение

будет компенсировано, если множество недопустимых относительных курсов M_d будет включено в множество безопасных относительных курсов M_s, т. е. $M_d \subset M_s$. В этом случае существуют безопасные относительные курсы, позволяющие реализовать стратегию расхождения G, и будут выполнены требования закона необходимого разнообразия Эшби. При ситуационном возмущении начальный относительный курс принадлежит множеству M_d, которое, как показано на рис. 1, заключено в границах $M_d = (\alpha - \theta, \alpha + \theta)$, где $\theta = \arcsin \frac{D_d}{D}$.

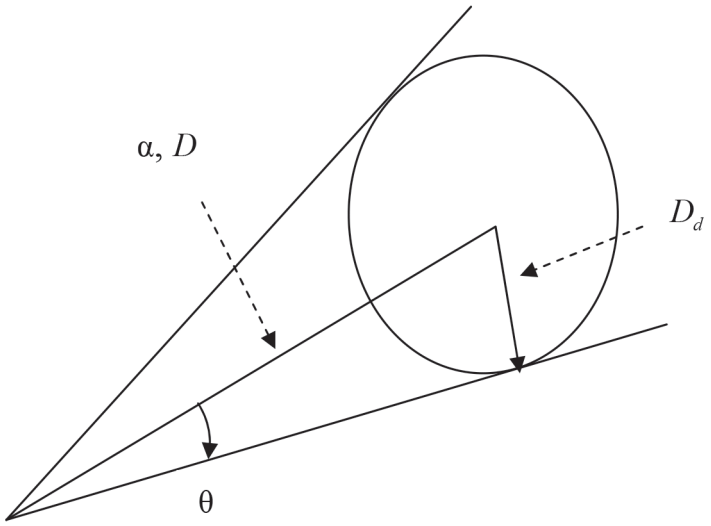


Рис. 1. Определение множества M_d

Множество M_d можно представить дугой $d = 2\arcsin\frac{D_d}{D} = 2$, причем $d = \pi$. Рассмотрим множество безопасных относительных курсов M_s, соответствующее маневрированию каждого из судов c_1 и c_2. При маневрировании судна с большей скоростью c_2 изменение его курса на 2π ведет к изменению относительного курса также на 2π. Если же маневрирует судно с меньшей скоростью c_1, то относительный курс изменяется в пределах от $K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin\rho$ до $K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin\rho$, как показано в работе [1]. Следовательно, множество относительных курсов при маневрировании судна c_1 характеризуется дугой $s = 2\arcsin\rho < \pi$.

Таким образом, при маневрировании судна c_2 множества $M_s = 2\pi$ и $M_d \subset M_s$, чего нельзя утверждать в случае маневрирования судна c_1. Закон необходимого разнообразия Эшби выполняется, если система бинарной координации $c_o(Bz)$ предусматривает компенсацию ситуационного возмущения следующими способами:

– совместным маневром обоих судов: c_1 и c_2;

– маневром судна с большей скоростью c_2.

Судно, которому предписывается системой c_o (Bz) выполнение маневра расхождения, будем называть *активным*, а судно, сохраняющее неизменными параметры движения, — *пассивным*.

При первом способе совместного маневрирования компенсация ситуационного возмущения производится двумя активными судами. В этом случае необходимо согласование маневров расхождения обоих судов, т. е. их координация. Очевидно, что координация обеспечивает увеличение дистанции кратчайшего сближения при выполнении маневров расхождения судов. Это происходит, как показано на рис. 2, для судов, сближающихся на встречных курсах, при изменении их начальных курсов в одну сторону (например, при увеличении курсов обоих судов). В случае сближения судов на попутных курсах для координации маневров расхождения необходимо изменение курсов судов в разные стороны (например, судно c_1 увеличивает курс, а судно c_2 — уменьшает курс).

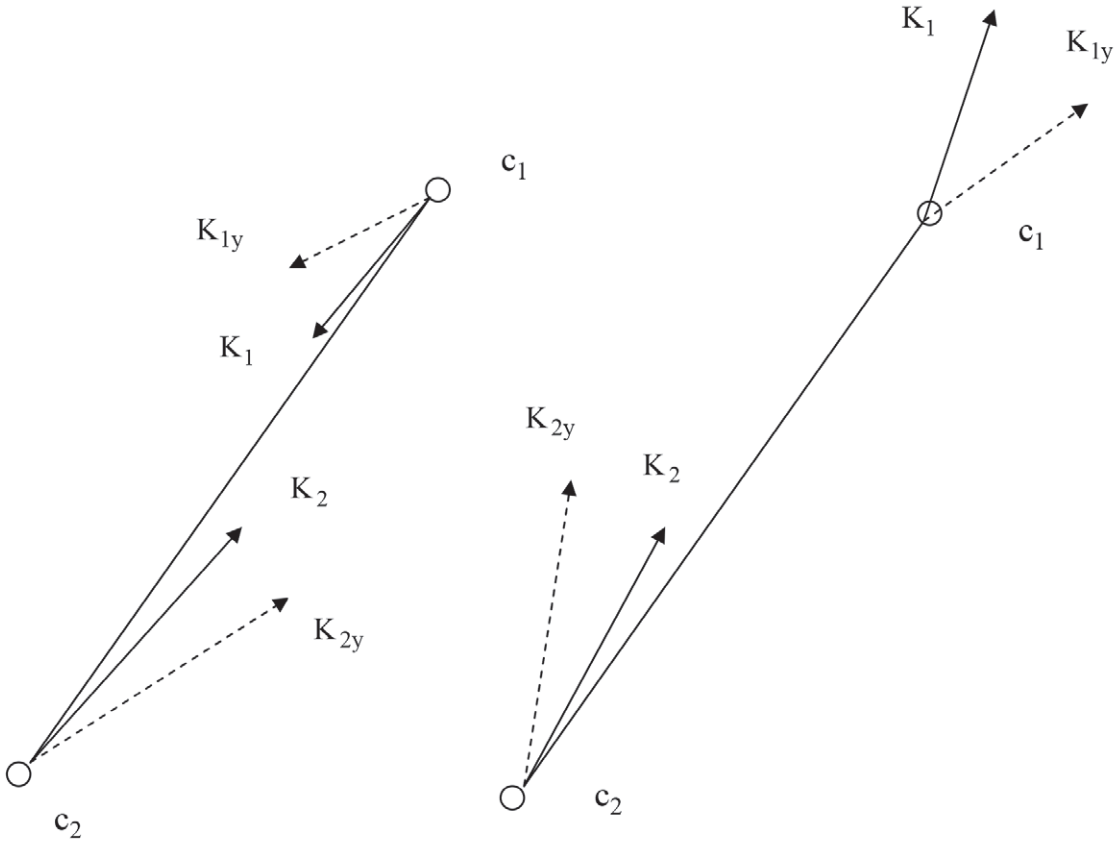


Рис. 2. Координация маневров расхождения судов

Изменение дистанции кратчайшего сближения D_{min} определяется составляющей суммарной скорости судов $V_2 \sin(K_{2y} - \alpha) - V_1 \sin(K_{1y} - \alpha)$, перпендикулярной к линии пеленга. Указанная скорость увеличивается, если составляющие скорости имеют разные знаки, чем и обоснованы выводы по координации маневров расхождения двух активных судов.

При втором способе, когда маневрирует только судно с большей скоростью, компенсация ситуационного возмущения производится одним судном, т. е. маневр расхождения выполняется одним из судов, в то время как другое судно сохраняет неизменные параметры движения. В этом случае не возникает необходимость в координации. Следует отметить, что бинарная координация служит для обеспечения выбора безопасных маневров расхождения пары судов из разных подмножеств курсов уклонения, для чего нет необходимости учитывать их динамику (как, например, в МППСС-72) в отличие от учета динамики при расчете параметров маневра расхождения. Также существенным является то, что рассматриваемая система бинарной координации предполагает согласование взаимодействия по расхождению только двух судов, и в ее рамках невозможно рассматривать ситуации опасного сближения большего числа судов.

Система бинарной координации $c_o(Bz)$ должна учитывать сближение судов с учетом их статуса, причем судно с большим статусом, как правило, превосходит по скорости судно с меньшим статусом. Для случая ω = 1 основным признаком координации являются статусы судов St_1 и St_2. Статус судна характеризует его возможность выполнять маневр расхождения в зависимости от рода его деятельности, конструкции и технического состояния. Правилом 18 МППСС-72 предусмотрены следующие статусы судов, расположенных в порядке возрастания:

– суда с механическим двигателем;
– парусные суда;
– рыболовные суда;

– суда, стесненные осадкой;

– суда, ограниченные в возможности маневрировать;

– суда, которые не могут управляться.

Принимаем указанную градацию статусов судов. Если статусы судов не равны, то судно с более высоким статусом является пассивным, а другое судно — активным. В случае одинаковых статусов ($St_1 = St_2$) определяющим параметром является скорость судов. В этом случае судно с более высокой скоростью c_2 является активным, а судно c_1 — пассивным. В случае равенства скоростей ($V_2 = V_1$) оба судна являются активными и изменяют свои курсы в зависимости от того, на каких (встречных или попутных) курсах они сближаются, как рассматривалось ранее. В случае $\omega = 2$ координатор $c_o(Bz)$ предписывает компенсацию ситуационного возмущения экстренным маневрированием [15].

Выводы

1. Показано, что при попадании пары судов в ситуацию опасного сближения возникает ситуационное возмущение, значение которого зависит от соотношения дистанции кратчайшего сближения и предельно допустимой дистанции.

2. Рассмотренная система бинарной координации удовлетворяет закону необходимого разнообразия Эшби, так как разнообразие имеющихся курсов уклонения соответствует разнообразию возможных опасных курсов сближения.

3. Предложена система бинарной координации, которая содержит два уровня в соответствии со значениями ситуационного возмущения, причем при его значении, равном единице, взаимные обязанности судов определяются с учетом соотношения статусов и скоростей, а при значении ситуационного возмущения, равном двум, предусмотрено экстренное маневрирование обоих судов.

4. В ситуации опасного сближения двух судов с одинаковыми статусами и скоростями их взаимные обязанности определяются тем, на каких курсах (встречных или попутных) происходит сближение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цымбал Н. Н.* Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. — Одесса: КП ОГТ, 2007. — 424 с.

2 *Бурмака И. А.* Управление группой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 1–13.

3. *Пятаков Э. Н.* Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э. Н. Пятаков, Р. Ю. Бужбецкий, И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков. — Херсон: Гринь Д.С., 2015. — 312 с.

4. *Пятаков Э. Н.* Определение областей взаимных обязанностей судов при опасном сближении / Э. Н. Пятаков, С. В. Копанский // Судовождение. — 2016. — № 26. — С. 137–143.

5. *Цымбал Н. Н.* Выбор маневра расхождения изменением курса судна / Н. Н. Цымбал, Э. Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств. — 2014. — № 20. — С. 100–104.

6. *Бурмака И. А.* Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Вестник Государственного морского университета им. адм. Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 2 (7). — С. 17–20.

7. *Булгаков А. Ю.* Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения / А. Ю. Булгаков // Водный транспорт. — 2014. — № 2. — С. 13–18.

8. *Бурмака И. А.* Маневр расхождения трех судов изменением курсов / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств. — 2014. — № 20. — С. 18–23.

9. *Бурмака И. А.* Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств. — 2015. — № 21. — С. 29–33.

10. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

11. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения на попутных курсах / А. И. Бурмака // Вестник Государственного морского университета им. адм. Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 2 (7). — С. 14–17.

12. *Вагущенко Л. Л.* Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Фенікс, 2013. — 180 с.

13. *Пятаков Э. Н.* Неопределенности в трактовке МППСС-72 при опасном сближении судов и выборе маневра расхождения / Э. Н. Пятаков // Судовождение. — 2013. — № 23. — С. 122–129.

14. *Эшби У. Росс.* Введение в кибернетику / У. Росс Эшби. — М.: Мир, 1959. — 256 с.

15. *Бурмака И. А.* Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бурмака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. — 202 с.

SYNTHESIS OF SYSTEM OF BINARY CO-ORDINATION AT DIVERGENCE OF VESSELS

The situation of dangerous rapprochement of two vessels is analysed, characterized by situation indignation, the value of which depends on correlation of distance of the shortest rapprochement and maximum-possible distance. Thus situation indignation can take on values equal to unit, at which divergence is produced by the standard manoeuvring, and value equal two, requiring the use of manoeuvre of urgent divergence.

The considered system of binary co-ordination takes into account the requirement of law of the necessary variety Eshby, which foresee accordance of variety of present courses of deviation to the variety of possible dangerous courses of rapprochement. It is shown that this requirement is executed during indemnification of situation indignation or simultaneous maneuver of both vessels or manoeuvre of ship with greater speed.

The system of binary co-ordination which is offered in the article contains two levels, the first level will be realized, when situation indignation takes on a value equal to unit, and the mutual duties of vessels are determined taking into account correlation of statuses and speeds, and at the value of situation indignation of equal to two the second level takes place and the urgent maneuverings of both vessels is foreseen.

At rapprochement of two vessels with identical statuses and speeds their mutual duties are determined to those, whether there are courses rapprochement meeting or passing.

Keywords: warning of collision of vessels, situation indignation, system of binary co-ordination, law of necessary variety.

REFERENCES

1. Tsimbal, N. N., I. A. Burmaka, and E. E. Tyupikov. *Gibkie strategii raskhozhdeniya*. Odessa: KP OGT, 2007.

2. Burmaka, I. A., and A. Yu. Bulgakov. "Management of the group of vessel in the situation of dangerous approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 1–13.

3. Pyatakov, E. N., R. Y. Buzhbeckij, I. A. Burmaka, and A. Y. Bulgakov. *Vzaimodeystvie sudov pri raskhozhdenii dlya preduprezhdeniya stolknoveniya*. Kherson: Grin D. S., 2015.

4. Pyatakov, E. N., and S. V. Kopanskiy. "Opredelenie oblastey vzaaimnykh obyazannostey sudov pri opasnom sblizhenii." *Sudovozhdenie* 26 (2016): 137–143.

5. Tsimbal, N. N., and E. N. Pyatakov. "Vibor manevra raskhozhdeniya izmeneniem kursa sudna." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnichtskikh sredstv* 20 (2014): 100–104.

6. Burmaka, I. A., and A. Y. Bulgakov. " Determination of range of courses of two vessels that provide safe passing." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 2(7) (2014): 17–20.

7. Bulgakov, A. Y. "Use of dangerous region of courses of two vessels for choice of possible manoeuvre of divergence." *Vodnyy transport* 2 (2014): 13–18.

8. Burmaka, I. A., and A. Y. Bulgakov. "Manevr raskhozhdeniya treh sudjv izmineniem kursov." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnichtskikh sredstv* 20 (2014): 18–23.

9. Burmaka, I. A., and A. Y. Bulgakov. "Vibor optimalnogo vektora upravleniya sudami izmineniem kursov dlya bezopasnogo rasrhozhdeniya." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnichtskikh sredstv* 21 (2015): 29–33.

10. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.

11. Burmaka, A. I. "Vessel's collision avoidance strategy in case of close-quarters situation when moving in the same direction." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 2(7) (2014): 14–17.

12. Vagushchenko, L. L. *Raskhozhdenie s sudami smeshcheniem na parallelnuyu liniyu puti.* Odessa: Feniks, 2013.

13. Pyatakov, E. N. "Neopredelennosti v traktovke MPPSS-72 pri opasnom sblizhenii sudov i vybore manevra raskhozhdeniya." *Sudovozhdenie* 23 (2013): 122–129.

14. Eshbi, U. Ross. *Vvedenie v kibernetiku*. M: Mir, 1959.

15. Burmaka, I. A., A. I. Burmaka, and R. Y. Buzhbeckij. *Ekstrennaya strategiya rasrhozhdeniya pri chrezmernom sblizhenii sudov.* LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Пятаков Эдуард Николаевич — кандидат технических наук, доцент. Национальный университет «Одесская морская академия» *epyatakov@ukr.net*	*Pyatakov Eduard Nikolaevich* — PhD, associate professor. National university "Odessa maritime academy" *epyatakov@ukr.net*
Копанский Станислав Валентинович — аспирант. Научный руководитель: *Пятаков Эдуард Николаевич*. Национальный университет «Одесская морская академия» *kopanskystas@mail.ru*	*Kopanskiy Stanislav Valentinovich* — postgraduate. Supervisor: *Pyatakov Eduard Nikolaevich*. National university "Odessa maritime academy" *kopanskystas@mail.ru*
Волков Евгений Леонидович — аспирант. Научный руководитель: *Пятаков Эдуард Николаевич*. Национальный университет «Одесская морская академия» *yev-volkov@yandex.ua*	*Volkov Evgeniy Leonidovich* — postgraduate. Supervisor: *Pyatakov Eduard Nikolaevich*. National university "Odessa maritime academy" *yev-volkov@yandex.ua*

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-29-43
УДК 656.61.052

Р. С. Царик,
Д. А. Акмайкин

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОГО ШТАБЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ВИДИМОСТИ С ХОДОВОГО МОСТИКА КОНТЕЙНЕРОВОЗА

В статье рассмотрен вопрос разработки алгоритма формирования контейнерного штабеля для обеспечения требуемой видимости с ходового мостика контейнеровоза. Использованы математические методы с геометрическими построениями и практический опыт обеспечения безопасной эксплуатации контейнеровозов. Предложен новый метод ступеней в обеспечении требуемой видимости с ходового мостика и основанный на нем алгоритм формирования контейнерного штабеля на стадии составления грузового плана в соответствии с установленными ограничениями. Отмечается универсальность предложенного метода для использования на контейнеровозах различных архитектурно-конструктивных типов

с любым состоянием загрузки. Рассмотрены примеры расчетов в соответствии с предложенным алгоритмом с использованием реальных параметров крупнотоннажного контейнеровоза, подтверждающие работоспособность и эффективность методики. Обоснована практическая целесообразность включения предложенного алгоритма в качестве расчетного модуля грузовых программ контейнеровозов для обеспечения их безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: суда-контейнеровозы, видимость с ходового мостика, мертвая зона видимости, контейнерный штабель, контейнерный грузовой план, безопасность судоходства.

Введение

Видимость с ходового мостика судна, наряду с обеспечением остойчивости и прочности судна, является одним из важнейших факторов обеспечения безопасности судоходства, поскольку возможность обозревать окружающую обстановку лежит в основе принятия решений по безопасному управлению судном. Видимость с ходового мостика регламентирована Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74) [1, Ч. V, Правило 22]. Актуальность данного требования обусловлена тем, что недостаточная видимость нередко является одной из причин столкновений судов, особенно больших судов-контейнеровозов с небольшими рыболовными судами [2]. Несоблюдение требований, предъявляемых к видимости, приводит к наложению штрафов на судовладельца и задержке судов при проходе через регулируемые акватории, такие, например, как Панамский канал. Недостаточная видимость также может привести к посадке на мель ввиду недостаточной видимости с судна средств навигационного ограждения опасностей [3]. Обеспечение требуемой видимости с ходового мостика должно находиться в числе факторов, которые необходимо учитывать при оценке рисков, анализе и математическом моделировании аварий в судоходстве [4], [5].

Особенность судов-контейнеровозов заключается в том, что они перевозят на палубе большую часть груза, который является препятствием в обеспечении достаточной видимости. Следует отметить, что на крупнейших современных контейнеровозах на палубе устанавливают контейнерные штабели высотой до 30 м [6]. Архитектурно-конструктивный тип судна должен быть таким, чтобы обеспечить надлежащую видимость при планируемой контейнеровместимости [6]. В течение последних нескольких лет стандартным для крупнейших контейнеровозов стал двухнадстроечный архитектурно-конструктивный тип, при котором надстройка с ходовым мостиком смещена в нос судна. Это позволяет увеличить контейнеровместимость и обеспечить надлежащую видимость. При составлении грузового плана контейнеровоза обеспечение видимости является одной из задач, которая должна быть решена [7]. Грузовой помощник капитана должен тщательно контролировать, чтобы запланированная погрузка не привела к нарушению требований в отношении видимости с ходового мостика. Все грузовые программы включают в себя функцию расчета видимости при конкретной загрузке судна, что, однако, представляет собой лишь констатацию состояния видимости, но не помогает экипажу решать вопрос о приведении ее к требуемому значению [8], [9].

В статье предложен алгоритм формирования контейнерного штабеля методом ступеней для обеспечения требуемой видимости, который позволит значительно расширить функционал грузовой программы. Причем рассматривается недеформированный корпус контейнеровоза, т. е. при посадке судна на ровный киль все осадки равны, а при наличии дифферента изменение осадок линейно. Рассматривается только дифферент на корму как наиболее используемый на практике, так и оказывающий негативное влияние на протяженность «мертвой зоны» видимости с ходового мостика. Крен судна не рассматривается, поскольку он обычно легко устраним и не оказывает влияния на видимость с ходового мостика. Обеспечение надлежащей видимости рассматривается с учетом того, что загрузка судна и последующие перестановки контейнеров обеспечивают необходимую остойчивость и прочность корпуса. Такое допущение считается уместным, поскольку использование современных программных средств контроля остойчиво-

сти и прочности позволяет оперативно отслеживать соответствующие изменения при любом изменении загрузки, в том числе обусловленном необходимостью обеспечения видимости с ходового мостика. Кроме того, нарушения видимости обычно вызваны относительно небольшим количеством контейнеров в верхних ярусах контейнерных штабелей, перестановка которых не оказывает значительного влияния на остойчивость и прочность. В том числе это обусловлено тем фактом, что в верхних ярусах обычно размещаются легкие или порожние контейнеры. Также принимается во внимание, что программные средства планирования загрузки судна позволяют определять наиболее эффективное размещение контейнеров не только с учетом требований безопасности, но и коммерческой целесообразности. При этом следует отметить, что обеспечение безопасности превалирует над вопросами коммерческой целесообразности. Так, необходимость размещения контейнеров с учетом ротации портов, безусловно, учитывается, но не должна приводить к игнорированию требований безопасности, в частности, обеспечения видимости с ходового мостика.

В конечном итоге, предполагается встраивание предлагаемого в статье алгоритма формирования контейнерного штабеля методом ступеней в грузовые программные комплексы контейнеровозов с тем, чтобы способствовать наиболее эффективному грузовому планированию с учетом требований безопасности (остойчивость, прочность, видимость, размещение режимных контейнеров) и коммерческой целесообразности (ротация портов, неэффективные штивки, ограничения перегрузочного оборудования и др.). Для постановки и решения задачи в работе используются обозначения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Обозначения, принятые в работе

Обозначение	Наименование
$_{ijk}$	Контейнерная ячейка: бэй — i, ряд — j, ярус — k
$t_{\min ij}$	Минимальное число ярусов в бэе i и ряде j на палубе
h_{ijk}	Высота контейнера в ячейке ijk
h_C	Высота стандартного контейнера 2,6 м
h_{HC}	Высота контейнера повышенной вместимости (high cube — 2,9 м)
m	Количество стандартных контейнеров h_c в штабеле
n	Количество контейнеров повышенной вместимости h_{HC} в штабеле
i (II′)	Шпангоут расчетного бэя i
nav (EE')	Шпангоут ходового мостика («глаза штурмана»)
L_{oa}	Длина судна (максимальная)
L_{bp}	Длина судна между перепендикулярами
L_a	Расстояние от кормового перпендикуляра до «глаза штурмана» $L_a = L_{oa} - L_f - L_b - 0{,}75$ (0,75 м — значение, установленное Конвенцией СОЛАС-74 [1, Ч. V, Правило 22] горизонтальное расстояние от иллюминатора ходового мостика до «глаза штурмана»
L_{em}	Расстояние от шпангоута ходового мостика до мидель-шпангоута $L_{em} = \frac{L_{bp}}{2} - L_a$. Знаки: «+» — если мидель-шпангоут находится в нос от шпангоута ходового мостика, «–» — если мидель-шпангоут находится в корму от шпангоута ходового мостика. Также определяются арифметически

Таблица 1
(*Продолжение*)

L_{mi}	Расстояние от мидель-шпангоута до шпангоута бэя i $L_{mi} = ML_i - L_{em}$. Знаки: «+», если мидель-шпангоут находится в корму от шпангоута ходового мостика, «–», если мидель-шпангоут находится в нос от шпангоута ходового мостика (также определяются арифметически)
L_b	Расстояние от кормового перпендикуляра до кормового среза судна
L_c	Расстояние от носового перпендикуляра до среза носовой оконечности судна: $L_c = L_{oa} - L_{bp} - L_b$
L_f	Расстояние от носовой переборки ходового мостика до среза носовой оконечности судна
$L_{V\max}$	Максимально допустимая протяженность «мертвой зоны» видимости, когда судно на ровном киле
$L'_{V\max}$	Максимально допустимая протяженность «мертвой зоны» видимости, когда судно с дифферентом на корму
L_V	Фактическая протяженность «мертвой зоны» видимости, когда судно на ровном киле
L'_V	Фактическая протяженность «мертвой зоны» видимости, когда судно с дифферентом на корму
D	Высота борта судна
d_f	Осадка носом
d_a	Осадка кормой
d_m	Осадка на миделе
	Осадка средняя расчетная: $d'_m = \dfrac{d_f + d_a}{2}$
d_{nav}	Осадка на шпангоуте ходового мостика *nav* (EE′)
d_i	Осадка на шпангоуте расчетного бэя i (II′)
Δd_{af} ψ	Дифферент: $\Delta d_{af} = d_a - d_f$ — в линейном выражении, в градусной мере
	Изменение осадки из-за дифферента, соответственно, на носовом перпендикуляре, кормовом перпендикуляре, шпангоуте *nav* или i. Знак: «+» — приращение осадки, «–» — уменьшение осадки. $\Delta d_m = 0$ (принято)
D_b	Возвышение ходового мостика над плоскостью киля
AH_i	Фактическая высота штабеля контейнеров в бэе i над главной палубой, включая высоту комингса трюма
AH_{ic}	Фактическая высота штабеля контейнеров в бэе i над крышкой трюма: $AH_{ic} = AH_i - CH$
MH_i	Максимально допустимая высота штабеля контейнеров в бэе i над главной палубой, включая высоту комингса трюма
MH_{ic}	Максимально допустимая высота штабеля контейнеров в бэе i над крышкой трюма: $MH_{ic} = MH_i - CH$
CH	Высота комингса трюма, включая крышку трюма от главной палубы — уровень, на котором начинает формироваться контейнерный штабель

Таблица 1
(*Окончание*)

ML_i	Расстояние от носовой переборки ходового мостика до передней грани штабеля контейнеров в бэе *i*
D_{h1}	Возвышение «глаза штурмана» над плоскостью киля: $D_{h1} = D_b$+1,8 (1,8 м — значение, установленное Конвенцией СОЛАС-74 [1, Ч. V, Правило 22]
D_{h2}	Возвышение верхней точки носовой оконечности судна над плоскостью киля
D_{h3}	Возвышение точки пересечения линии видимости с перпендикуляром, возведенным в носовой оконечности судна, над плоскостью киля: $D_{h3} = D_{h1} - Y$
D_h	Наибольшее из значений D_{h2} и D_{h3}. Для контейнеровоза с контейнерами на палубе $D_{h3} \geq D_{h2}$
Y	Расстояния по вертикали между «глазом штурмана» и точкой пересечения линии видимости с перпендикуляром, возведенным в носовой оконечности судна: $Y = (D_{h1} - (D+AH_i))\ (L_f + 0{,}75) / (ML_i + 0{,}75)$
Обозначения точек, используемых на рисунках	
M	Абсцисса мидель-шпангоута (абсцисса)
X	Абсцисса точки пересечения проекций ватерлиний на боковую проекцию судна, при дифференте и на ровном киле. В этой точке изменение осадки при дифференте равно нулю.
E	Точка «глаза штурмана» (точка выхода)
E'	Точка пересечения перпендикуляра, опущенного из «глаза штурмана» на плоскость поверхности воды
E''	Проекция точки *I* на перпендикуляр «глаза штурмана»
I	Верхняя точка передней грани штабеля контейнеров в расчетном бэе *i*. Точка касания или точка прерывания. Находится в месте пересечения линий, соответствующих значениям AH_i и ML_i
I'	Точка пересечения перпендикуляра, опущенного из точки *I* на плоскость поверхности воды
V'_1	Точка касания фактической линии видимости с ватерлинией при посадке на ровный киль (точка входа)
V_1	Точка касания фактической линии видимости с ватерлинией при дифференте на корму (точка входа)
V'_2	Точка касания максимально допустимой линии видимости с ватерлинией при посадке на ровный киль (точка входа)
V_2	Точка касания максимально допустимой линии видимости с ватерлинией при дифференте на корму (точка входа)

Основная часть

Система выражений (1) описывает условия, при которых «мертвая зона» видимости не должна превышать допустимой в соответствии с требованиями Конвенции СОЛАС-74 [1, Ч. V, Правило 22, п. 1]:

$$\left.\begin{array}{c} L'_V \leq L'_{V\max}; \\ L'_{V\max} \leq 2L_{oa}, \text{ при } L_{oa} < 250\,\text{м} \\ L'_{V\max} \leq 500\,\text{м}, \text{ при } L_{oa} \geq 250\,\text{м} \end{array}\right\} \quad (1)$$

На рис. 1 приведена номенклатура конструктивных элементов и обозначений.

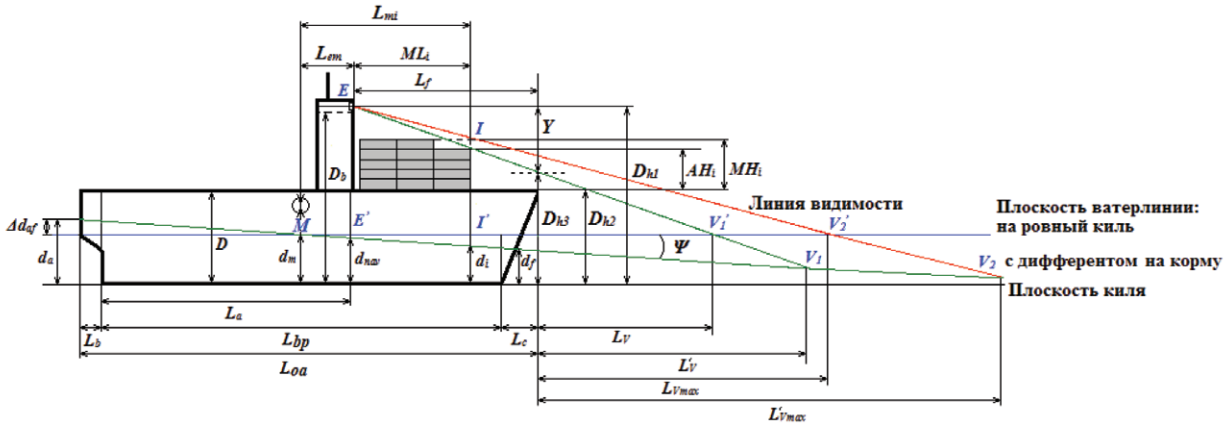


Рис. 1. Номенклатура обозначений конструктивных элементов и параметров

«Мертвую зону» видимости контейнеровоза можно определить по формуле [10]:

$$L'_V = \left(\frac{D_{h3} + L_c\left(\frac{Y}{L_f}\right) - d'_m - \frac{\Delta d_{af}}{2}}{\left(\frac{\Delta d_{af}}{L_{bp}}\right) + \left(\frac{Y}{L_f}\right)} \right) - L_c . \qquad (2)$$

В формуле (2) дифферент на корму считается отрицательным. Ее недостатком является то, что некоторые из входящих в нее компонентов требуют дополнительных расчетов, которые могут снизить итоговую точность вычислений.

Следует отметить, что в данной работе предлагается методика расчета дальности видимости с мостика через тангенс угла линии видимости к поверхности моря γ. Для того чтобы не усложнять расчеты, судно принимается на ровный киль. Наличие дифферента учитывается в последующих расчетах через осадки, имея в виду тот факт, что дифферент контейнеровоза определяется не только размещением груза на судне, но и балластировкой. Можно принять, что формирование контейнерного штабеля в контексте обеспечения видимости с ходового мостика будет выполняться в условиях, когда дифферент судна уже определен. Такая особенность свойственна контейнеровозам, в частности, ввиду разного веса контейнеров при их стандартных размерах. Это может привести к тому, что при одном и том же дифференте судна конфигурация контейнерных штабелей может быть совершенно разной.

Как отмечалось ранее, в вопросах обеспечения видимости часто участвуют легкие или порожние контейнеры верхних ярусов, перестановка которых не оказывает значительного влияния на дифферент (так же, как на остойчивость и прочность), но может оказывать значительное влияние на видимость с ходового мостика. В акваториях, имеющих ограничения по осадке и возвышению судна над уровнем воды, дифферент судна планируется заранее. Поэтому финальное формирование контейнерных штабелей для обеспечения видимости может выполняться в данном случае с учетом дифферента так, чтобы не изменять его. Суть методики отражена на рис. 2.

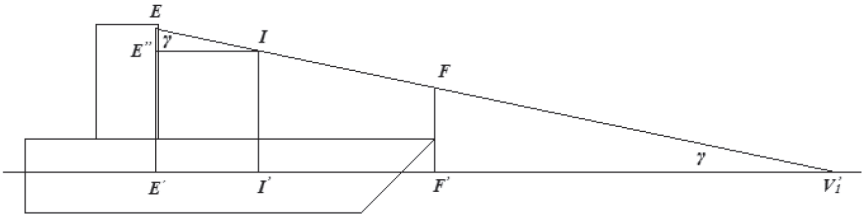


Рис. 2. Методика расчета через угол линии видимости γ в графическом виде

Тангенс рассчитывается из подобных прямоугольных треугольников $EE''I$ и $EE'V_1$:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{EE''}{E''I} = \frac{EE'}{E'V_1'}. \quad (3)$$

Используя обозначения конструктивных элементов и параметров судна, выражение (3) можно представить в виде

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{D_{h1} - D - AH_i}{ML_i + 0,75} = \frac{D_{h1} - d_{nav}}{L_f + 0,75 + L_1'}. \quad (4)$$

Из выражения (4) «мертвая зона» видимости рассчитывается следующим образом:

$$L_V' = \frac{(ML_i + 0,75)(D_{h1} - d_{nav})}{D_{h1} - D - AH_i} - L_f - 0,75. \quad (5)$$

Суть определения «мертвой зоны» видимости с ходового мостика в практическом применении заключается в определении максимально допустимой высоты штабеля контейнеров в бэе i (MH_i). Для разных бэев MH_i будет разной: чем больше ML_i, тем меньше должна быть MH_i.

Выражение (6) описывает требуемое условие, при котором высота штабеля контейнеров на палубе в расчетном бэе i не должна превышать допустимую [11]:

$$\max_j \left(\Sigma_{i\in F,\, k\geq t_{\min ij}} h_{ijk}\right) \leq MH_i, \quad (6)$$

где F — бэи, расположенные в нос от надстройки.

Метод ступеней

Зная допустимую высоту штабеля контейнеров для данного бэя, можно определить количество контейнеров, которые могут быть погружены без нарушения требования к видимости с ходового мостика, и их комбинацию по высотам. Для этого предлагается использовать разработанный авторами *метод ступеней*, заключающийся в том, что штабель контейнеров в каждом бэе представляется как ступень воображаемой лестницы. При этом, очевидно, что для соблюдения требований к видимости, максимальные допустимые высоты этих ступеней (MH_i) должны снижаться по направлению от надстройки к носу судна.

Если фактическая высота штабеля превышает допустимую ($AH_i > MH_i$), то теоретическая линия видимости прервется в точке соприкосновения с верхним контейнером в штабеле — точке прерывания (I). Если фактическая высота штабеля равна или очень близка к допустимой ($AH_i \approx MH_i$), то теоретическая линия видимости, не прерываясь, коснется верхнего контейнера в штабеле — точки касания (I). Любые последующие увеличения дифферента судна на корму могут привести к тому, что эта линия будет прервана, так как точка касания сместится ближе к «глазу штурмана» и поднимется вверх. Это может быть вызвано расходованием топлива или балластировкой во время рейса. Кратковременные прерывания линии видимости могут наблюдаться при значительной килевой качке. На практике это будет означать, что «мертвая зона» видимости превысит допустимые пределы. Если при загрузке контейнеров возникает точка прерывания, то загрузка должна быть пересмотрена с тем, чтобы устранить эту точку. Если при загрузке возникает точка касания, то она становится определяющей при расчете «мертвой зоны» видимости. Суть метода ступеней отражена на рис. 3.

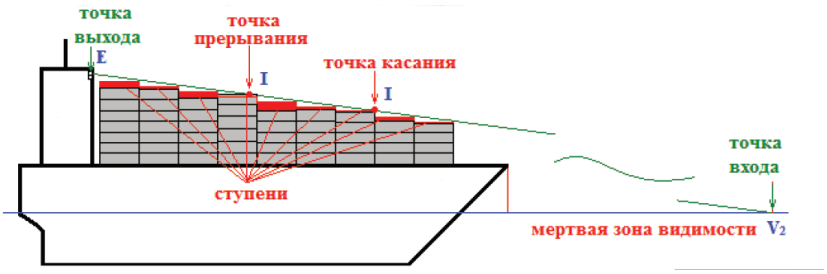


Рис. 3. Схематическое изображение метода ступеней

MH_i можно рассчитать из подобных прямоугольных треугольников $EE'V_2$ и $II'V_2$. Для расчетов используется треугольник видимости, представленный на рис. 4.

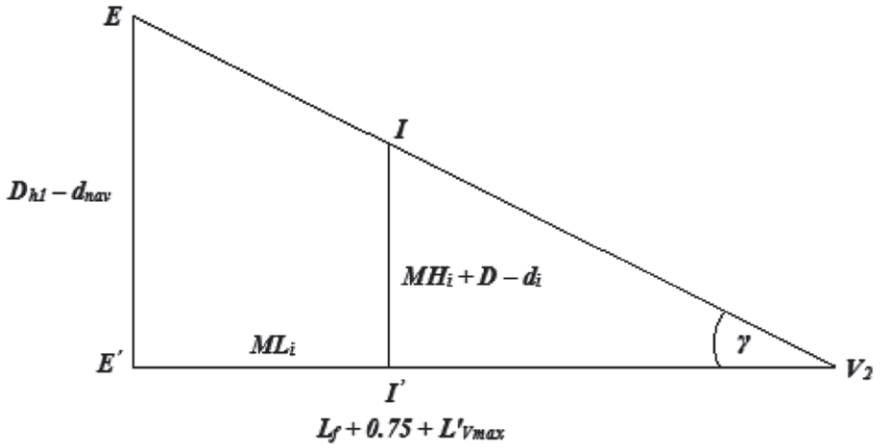


Рис. 4. Треугольник видимости

Из свойств подобных прямоугольных треугольников следует

$$\frac{II'}{EE'} = \frac{E'V_2 - E'I'}{E'V_2}$$

или в принятых обозначениях конструктивных элементов и параметров судна —

$$\frac{MH_i + D - d_i}{D_{h_1} - d_{nav}} = \frac{L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}} - ML_i}{L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}}},$$

откуда

$$MH_i = \frac{\left(D_{h_1} - d_{nav}\right) \cdot \left(L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}} - ML_i\right)}{L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}}} - D + d_i. \qquad (7)$$

Значения d_{nav} и d_i необходимо рассчитывать для каждой конкретной посадки судна. Только в случае посадки судна на ровный киль все осадки будут равны между собой: $d_a = d_{nav} = d_m = d_i = d_f$, и дополнительных расчетов не потребуется.

Проекции ватерлиний судна при дифференте и на ровный киль пересекаются в точке X, абсцисса которой соответствует абсциссе центра тяжести площади ватерлинии. Эта точка отстоит от абсциссы мидель-шпангоута (M) на определенное расстояние, которое для разных осадок приводится в гидростатических таблицах судна. В данной работе для упрощения расчетов точка X сводится в точку M. Тогда принимается, что $\Delta d_m = 0$. Это считается оправданным, поскольку расстояние между точками X и M в большинстве практических случаев незначительно в масштабах длины судна и поэтому не оказывает серьезного влияния на суть предлагаемой методики расчетов. При необходимости расчеты можно выполнить и при условии, что $\Delta d_m \neq 0$, как и для любого промежуточного шпангоута, по описанному далее методу. Поправки на дифферент к осадкам, учитывающие отстояние марок углубления от перпендикуляров, приводятся в информации об остойчивости судна.

Для составления универсальной расчетной формулы необходимо рассмотреть случай с дифферентом, который представляется как линейное приращение или уменьшение осадки на конкретном шпангоуте. Для расчета изменений осадки используется универсальный треугольник осадок, приведенный на рис. 5. Здесь DD' — изменение осадки на перпендикуляре, dd' — изменение осадки на расчетном шпангоуте. Точки D и d лежат на теоретической ватерлинии при посадке судна на ровный киль. Точки D' и d' лежат на фактической ватерлинии при дифференте, X — точка пересечения ватерлиний.

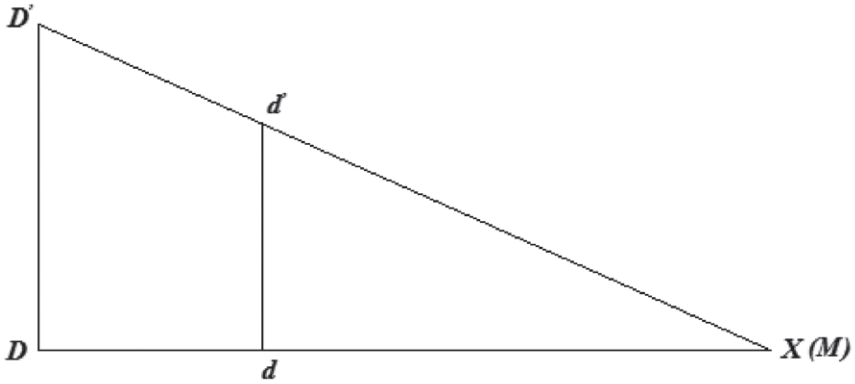


Рис. 5. Универсальный треугольник осадок

Из свойств подобных прямоугольных треугольников следует

$$dd' = \frac{DD' \cdot dM}{DM}. \tag{8}$$

В зависимости от расположения расчетных шпангоутов (*nav* (*EE'*), *i* (*II'*) и миделя (*M*)) выбираются расчетные элементы и применяются знаки в формуле (9). Для расчета важно учитывать расположение расчетных шпангоутов относительно друг друга. Для рассматриваемой задачи шпангоут *i* всегда находится в нос от шпангоута *nav* (*i* > *nav* или *I* > *E*). Варианты взаимного расположения расчетных шпангоутов в зависимости от архитектурно-конструктивного типа контейнеровоза и состояния загрузки представлены на рис. 6.

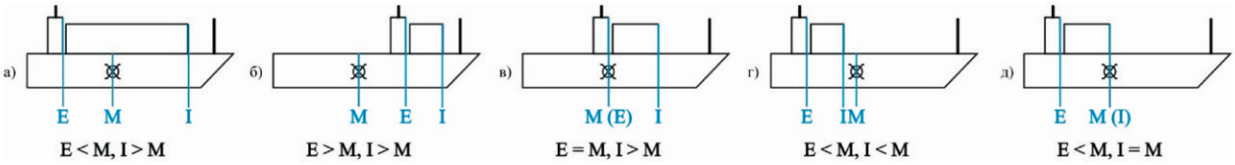


Рис. 6. Варианты взаимного расположения расчетных шпангоутов
при разных архитектурно-конструктивных типах контейнеровозов и состояниях загрузки:
а — *E* < *M*, *I* > *M*; *б* — *E* > *M*, *I* > *M*; *в* — *E* = *M*,*I* > *M*; *г* — *E* < *M*, *I* < *M*; *д* — *E* < *M*, *I* = *M*

Учитывая общую формулу (8), можно для каждого конкретного случая определить свою расчетную формулу в соответствии с матрицей, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Матрица расчетных элементов

Взаимное расположение шпангоутов	Знаки приращения осадок	Назначение расчетных элементов						
	Δd_{nav}	Δd_i	DD'	dM	DM	DD'	dM	DM
Вариант *а*	+	–	Δd_a	$+L_{em}$	$L_a + L_{em}$	Δd_f	L_{mi}	$L_{bp} - L_a - L_{em}$
Вариант *б*	–	–	Δd_f	$-L_{em}$	$L_{bp} - L_a + L_{em}$	Δd_f	L_{mi}	$L_{bp} - L_a + L_{em}$
Вариант *в*	0	–	–	0	–	Δd_f	L_{mi}	$L_{bp} - L_a$
Вариант *г*	+	+	Δd_a	$+L_{em}$	$L_a + L_{em}$	Δd_a	$-L_{em}$	$L_a + L_{em}$
Вариант *д*	+	0	Δd_a	$+L_{em}$	$L_a + L_{em}$	–	0	–

Знаки расчетных элементов в табл. 2 указаны с учетом взаимного расположения расчетных шпангоутов и условий задания знаков, установленных для решаемой задачи. Поскольку рассматривается линейный дифферент на корму, $\Delta d_a > 0$, $\Delta d_f < 0$, а принятое упрощение о совпадении точек X и M означает, что $|\Delta d_a| = |\Delta d_f|$.

Фактические осадки находятся по формулам:

$$d_{nav} = d'_m + \Delta d_{nav};$$

$$d_i = d'_m + \Delta d_i.$$

Тогда формулу (7) можно представить в виде

$$MH_i = \frac{\left(D_{h_i} - (d'_m + \Delta d_{nav})\right) \cdot \left(L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}} - ML_i\right)}{L_f + 0,75 + L'_{v_{\max}}} - D + \left(d'_m + \Delta d_i\right). \quad (9)$$

Высота штабеля контейнеров есть сумма высот контейнеров, из которых он составлен. Поскольку высота контейнеров стандартизирована, зная максимально допустимую высоту штабеля контейнеров для данного бэя (MH_{ic}), можно определить количество контейнеров, которые могут быть погружены без нарушения требований к видимости с ходового мостика, и их комбинацию по типам:

$$MN_{ic} = mh_C + nh_{HC}. \quad (10)$$

Максимальное количество контейнеров одной высоты в штабеле можно определить по формулам:

$$m = \left\lfloor \frac{MH_{ic}}{h_C} \right\rfloor;$$

$$n = \left\lfloor \frac{MH_{ic}}{h_{HC}} \right\rfloor. \quad (11)$$

На практике возникает необходимость размещения в одном штабеле контейнеров разной высоты: *стандартной* и *повышенной*. В таком случае используется следующий расчетный алгоритм.

1. Если определяющей является совокупность стандартных контейнеров (h_c) в штабеле, то используют следующие формулы:

$$\left.\begin{array}{l} m = \left\lfloor \dfrac{MH_{ic}}{h_C} \right\rfloor, \ m \geq 1, \ m \in N; \\ n = \left\lfloor \dfrac{\left\{ \dfrac{MH_{ic}}{h_C} \right\} \cdot h_C}{h_{HC}} \right\rfloor, \ n \geq 1, \ n \in N \end{array}\right\}.$$

2. Если определяющей является совокупность контейнеров повышенной вместимости (h_{HC}) в штабеле, то используют следующие формулы:

$$\left.\begin{array}{l} n = \left\lfloor \dfrac{MH_{ic}}{h_{HC}} \right\rfloor, \ n \geq 1, \ n \in N; \\ m = \left\lfloor \dfrac{\left\{ \dfrac{MH_{ic}}{h_{HC}} \right\} \cdot h_{HC}}{h_C} \right\rfloor, \ m \geq 1, \ m \in N \end{array}\right\}.$$

Кроме того, на практике возникает необходимость расчета количества контейнеров одного типа при известном количестве контейнеров другого типа в штабеле. В данном случае используют формулу

$$m = \left\lfloor \frac{MH_{ic} - nh_{HC}}{h_{\text{C}}} \right\rfloor,\ m \geq 1,\ m \in N$$

или

$$n = \left\lfloor \frac{MH_{ic} - mh_{\text{C}}}{h_{HC}} \right\rfloor,\ n \geq 1,\ n \in N.$$

Пример 1. Необходимо определить максимальную высоту штабеля контейнеров для заданных условий, используя фактические данные контейнеровоза *C*-серии компании *Mitsui O.S.K. Lines* (8110 ДФЭ):

D_{h1} = 54,4 м; d_a = 14,5 м; d_f = 13,5 м; L_f = 226,28 м; $L'_{V\max}$ = 500 м; ML_i = 142,5 м; D = 25 м; L_{em} = 64,3 м; L_a = 84,5 м; L_{bp} = 302 м; L_{mi} = 79 м; СН = 2,27 м.

Вариант загрузки и архитектурно-конструктивный тип судна соответствуют варианту 1 табл. 2. Тогда

$$\Delta d_{nav} = \frac{\Delta d_a \cdot L_{em}}{L_a + L_{em}} = \frac{0,5 \cdot 64,3}{84,5 + 64,3} = 0,22 \text{ м};$$

$$\Delta d_i = \frac{\Delta d_f \cdot L_{mi}}{L_{bp} - L_a - L_{em}} = \frac{-0,5 \cdot 79}{302 - 84,5 - 64,3} = -0,26 \text{ м};$$

$$d'_m = \frac{d_f + d_a}{2} = \frac{13,5 + 14,5}{2} = 14,0 \text{ м};$$

$$MH_i = \frac{(54,4 - 14,0 + 0,22) \cdot (226,28 + 0,75 + 500 - 142,5)}{226,28 + 0,75 + 500} - 25 + (14,0 - 0,26) = 21,4 \text{ м};$$

$$MH_{ic} = MH_i - CH = 21,4 - 2,27 = 19,13 \text{ м}.$$

Пример 2. Рассчитать варианты формирования штабеля при максимально допустимой высоте штабеля (MH_{ic}) в 19,13 м.

Количество стандартных контейнеров, которые могут быть погружены в данный штабель,

$$m = \left\lfloor \frac{MH_{ic}}{h_{\text{C}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{19,13}{2,6} \right\rfloor = \lfloor 7,4 \rfloor = 7 \text{ контейнеров}.$$

Количество контейнеров повышенной вместимости, которые могут быть погружены в данный штабель,

$$n = \left\lfloor \frac{MH_{ic}}{h_{HC}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{19,13}{2,9} \right\rfloor = \lfloor 6,6 \rfloor = 6 \text{ контейнеров}.$$

Возможность смешанной загрузки контейнеров, с учетом рассмотренного ранее варианта 1 табл. 2,

$$n = \left\lfloor \frac{\left\{ \frac{MH_{ic}}{h_{\text{C}}} \right\} \cdot h_{\text{C}}}{h_{HC}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,4 \cdot 2,6}{2,9} \right\rfloor = \lfloor 0,36 \rfloor = 0.$$

Поскольку $n < 1$, требование не выполняется. Поэтому догрузить контейнер повышенной вместимости в данных условиях не получится,

$$m = \left\lfloor \frac{\left\{ \frac{MH_{ic}}{h_{HC}} \right\} \cdot h_{HC}}{h_{\text{C}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{0,6 \cdot 2,9}{2,6} \right\rfloor = \lfloor 0,7 \rfloor = 0.$$

Поскольку $m < 1$, требование не выполняется. Поэтому догрузить стандартный контейнер в данных условиях не получится.

Пример 3. Определить возможность смешанной загрузки контейнеров, когда задано требуемое количество контейнеров одного типа, $MH_{ic} = 19,13$ м.

При $m = 4$

$$n = \left\lfloor \frac{MH_{ic} - mh_{\text{C}}}{h_{HC}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{19,13 - 4 \cdot 2,6}{2,9} \right\rfloor = \lfloor 3,4 \rfloor = 3.$$

Следовательно, можно догрузить три контейнера повышенной вместимости.

При $n = 5$

$$m = \left\lfloor \frac{MH_{ic} - nh_{HC}}{h_{\text{C}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{19,13 - 5 \cdot 2,9}{2,6} \right\rfloor = \lfloor 1,8 \rfloor = 1.$$

Следовательно, можно догрузить один стандартный контейнер.

Заключение

Следует отметить, что при рассмотрении данного вопроса использовалось несколько значений осадок судна. В частности, были введены значения осадки на шпангоуте ходового мостика *nav* (*EE′*) и на шпангоуте расчетного бэя *i* (*II′*). На практике в настоящее время используются осадки носом, кормой и на миделе, для снятия которых на борту судна нанесены марки углублений и могут быть установлены специальные датчики.

Определение промежуточных осадок (на промежуточных шпангоутах) может быть выполнено следующими способами:

– расчетным;

– техническим.

Расчетный способ заключается в использовании линейного интерполирования и рассмотрен в данной работе, *технический способ* — в использовании датчиков осадок, установленных по корпусу судна, в частности в рамках системы оперативного контроля деформаций корпуса контейнеровоза (СОКДКК) [12], [13]. При этом также может быть использована линейная интерполяция.

Важно учитывать, что помимо требований СОЛАС-74 видимость с ходового мостика может регламентироваться и региональными правилами, которые, однако, не должны им противоречить. В частности, морская администрация Панамского канала (АСР) устанавливает свои правила в отношении видимости с ходового мостика [10].

Предложенный метод ступеней и основанный на нем расчетный алгоритм позволяют определить:

1) фактическую мертвую зону видимости для данной загрузки;

2) максимально допустимую высоту штабеля каждого бэя для требуемого значения видимости;

3) бэй, в котором превышена максимально допустимая высота штабеля;

4) комбинацию контейнеров для формирования штабеля исходя из приоритетных требований: максимального количества контейнеров, максимальной видимости и т. п.;

5) влияние изменения посадки судна на видимость при одинаковой и изменяющейся загрузке; и другое.

Следует отметить, что предложенный алгоритм может использоваться для выполнения расчетов с использованием любых промежуточных значений мертвой зоны видимости, а не только

для максимальных, которые регламентированы СОЛАС. Для этого достаточно подставить в формулу соответствующие значения.

Расчетный метод предложенного алгоритма неоднократно использовался авторами на практике во время работы в качестве грузового помощника капитана крупнотоннажных контейнеровозов при совместной с портовыми планерами проработке грузового плана и полностью себя оправдал. Внедрение предложенного алгоритма как программного модуля грузовых программ контейнеровозов позволит грузовому помощнику капитана легко контролировать составление грузового плана и на раннем этапе устранять нарушения, которые приводят к ограничениям видимости с ходового мостика. При этом программа сможет предлагать варианты формирования контейнерного штабеля исходя из заданных условий, включая обеспечение необходимой остойчивости и прочности судна.

Представляется целесообразным, чтобы система управления безопасностью (СУБ) судна, разрабатываемая судовладельцем, включала конкретные требования в отношении обеспечения видимости с ходового мостика. Такие требования могут содержать предложенные в данной работе процедуру и расчетный алгоритм, адаптированные под конкретные требования судовладельца и технические характеристики судна. Это позволит повысить эффективность СУБ в части обеспечения безопасной эксплуатации судов [14] и снизить вероятность аварий, возникающих ввиду недостаточной видимости с ходового мостика, а также избежать штрафных санкций, которые могут быть наложены на судно морскими администрациями из-за нарушения требований к видимости при плавании в регулируемых акваториях. Таким образом, практическая целесообразность включения предложенного алгоритма в качестве расчетного модуля грузовых программ контейнеровозов для обеспечения их безопасной эксплуатации считается обоснованной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74). — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2015. — 1087 с.

2. Japan Transport Safety Board. Marine Accident Investigation Report MA 2015-10 / JTSB. — Tokyo, 2015.

3. Report on investigation into marine accident m/v Godafoss V2PM7 grounding in Loperen, Hvaler on 17 February 2011 / AIBN. — Lillestrom: Accident Investigation Board Norway, 2012. — 86 p.

4. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. – № 1 (20). — С. 89–96.

5. *Некрасов С. Н.* Комбинированный метод оценки навигационной безопасности при плавании по внутренним водным путям / С. Н. Некрасов, А. А. Прохоренков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 106–108.

6. *Царик Р. С.* Перспективы развития судов контейнеровозов / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Материалы юбилейной десятой междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока». — Владивосток, 2013. — С. 149–154.

7. *Pacino D.* Fast generation of container vessel stowage plans. PhD Thesis. / D. Pacino. — Copenhagen: IT University, 2012. — 104 p.

8. XVELA. PowerStow Brochure. — USA, Oakland: XVELA, 2015. — 4 p.

9. StowMan: Case Study. — Germany, Schenefeld: Interschalt Maritime Systems AG, 2015. — 76 p.

10. The Panama Canal Authority. Advisory to Shipping No. A-17-2012. — Panama: PCA, 2012. — 3 p.

11. *Zeng M.* Automated stowage planning for large containerships with improved safety and stability / M. Zeng, M. Y. H. Low, W. J. Hsu, S. Y. Huang, F. Liu, C. A. Win // Proceedings of the Winter Simulation Conference. — Winter Simulation Conference, 2010. — Pp. 1976–1989.

12. *Царик Р. С.* Управление рисками и снижение аварийности в морских контейнерных перевозках / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин, М. А. Москаленко, С. В. Лосев // Транспорт: наука, техника, управление. — 2015. — № 2. — С. 37–42.

13. *Царик Р. С.* Анализ причин и возможностей учета деформаций корпуса контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник государственного морского университета им. адм. Ф. Ф. Ушакова. — 2015. — № 2 (11). — С. 39–41.

14. *Сазонов А. Е.* Использование метода экспертных отношений предпочтения для оценки уровня совершенства системы управления безопасностью морского судна / А. Е. Сазонов, Г. С. Осипов, В. Д. Клименко // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 94–104.

DEVELOPMENT OF CONTAINER STACK FORMING ALGORITHM FOR ENSURING OF REQUIRED VISIBILITY FROM NAVIGATION BRIDGE OF CONTAINER SHIP

In the article development of container stack forming algorithm for ensuring of required visibility from navigation bridge of container ship is considered. Mathematical methods, including geometrical plotting, and practical knowledge of safety ensuring on container ships are used. New steps method for ensuring of required visibility from navigation bridge, and based on it algorithm of container stack forming at the stage of container stowage planning, in accordance with established restrictions is proposed. Universal compatibility of proposed method for using it on container ships of different design in any loading condition noticed. Calculation examples based on proposed algorithm, using actual particulars of container ship of large capacity, confirming functionality and effectiveness of the method, are considered. Practical suitability of inclusion of proposed algorithm into container ships' cargo programs as calculation module for safety ensuring is consequently substantiated.

Keywords: container ships, navigation bridge visibility, blind zone of visibility, container stack, container stowage plan, safety of navigation.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnaja Konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74). SPb.: ZAO CNIIMF, 2015.

2. Japan Transport Safety Board. Marine Accident Investigation Report MA 2015-10 / JTSB. Tokyo, 2015.

3. Report on investigation into marine accident m/v Godafoss V2PM7 grounding in Loperen, Hvaler on 17 February 2011 / AIBN. Lillestrom: Accident Investigation Board Norway, 2012.

4. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij 1(20) (2013): 89–96.

5. Nekrasov, S. N., and A. A. Prohorenkov. "Combined simulation while estimation of inland waterway navigation safety." Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij 1 (2011): 106–108.

6. Tsarik, R. S., and D. A. Akmaykin. "Perspektivy razvitija sudov kontejnerovozov." Materialy jubilejnoj desjatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii Problemy transporta Dalnego Vostoka. Vladivostok, 2013: 149–154.

7. Pacino, D. Fast generation of container vessel stowage plans. PhD Thesis. Copenhagen: IT University, 2012.

8. XVELA. PowerStow Brochure. USA, Oakland: XVELA, 2015.

9. StowMan: Case Study. Germany, Schenefeld: Interschalt Maritime Systems AG, 2015.

10. The Panama Canal Authority. Advisory to Shipping No. A-17-2012. Panama: PCA, 2012.

11. Zeng, M., M. Y. H. Low, W. J. Hsu, S. Y. Huang, F. Liu, and C. A. Win. "Automated stowage planning for large containerships with improved safety and stability." Proceedings of the Winter Simulation Conference. Winter Simulation Conference, 2010: 1976–1989.

12. Tsarik, R. S., D. A. Akmaykin, M. A. Moskalenko, and S. V. Losev. "Risk management and reduction of accident rate in container shipping." TRANSPORT: Science, Technology, Management 2 (2015): 37–42.

13. Tsarik, R. S., and D. A. Akmaykin. "Cause and count capability analysis container ship's hull deformation." Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova 2(11) (2015): 39–41.

14. Sazonov, A. E., G. S. Osipov, and V. D. Klimenko. "Using expert preference relations to assess the perfection level of ships safety management system." Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij 3(19) (2013): 94–104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Царик Руслан Станиславович — аспирант.
Научный руководитель:
Акмайкин Денис Александрович
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
rex-infinity@yandex.ru
Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент.
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
akmaykin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsarik Ruslan Stanislavovich — postgraduate.
Supervisor:
Akmaykin Denis Aleksandrovich
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy
rex-infinity@yandex.ru
Akmaykin Denis Aleksandrovich —
PhD, associate professor.
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy
akmaykin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-43-50
УДК 656.6

А. Л. Кузнецов,
А. В. Галин

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СОВРЕМЕННОГО МОРСКОГО ПОРТА

На основе анализа характеристик и параметров обоснована уникальность каждого порта, обусловленная наличием множества моделей их развития. Доказана необходимость единой процедуры анализа условий, управляющих факторов и возмущающих воздействий, гарантирующей адекватность выбора направления развития порта. Показано, что любой проект строительства нового или развития существующего порта должен основываться на научном анализе текущего (начального) и конечного (целевого) состояний и процедуре перехода между этими состояниями в пространстве оцениваемых параметров. Сформулированы методологические принципы прогнозирования и проектирования развития портов на основе сценарно-событийного прогноза, использования комплексного анализа всего пространства возможного развития основных факторов и уровня их влияния на порт в будущем как альтернативы традиционным инерциальным методам. Выводы подкреплены примерами развития конкретных портов.

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, развитие порта, методология, событийный прогноз.

Введение

Экономический рост и развитие производства невозможны без опоры на эффективную транспортную инфраструктуру страны, обеспечивающей взаимодействие производственных систем и отраслей. Для создания и функционирования эффективной транспортной инфраструктуры необходимо создание новых и реконструкция существующих объектов транспортной системы страны. Такая задача определена в «Транспортной стратегии РФ на период до 2030 г.» как на долгосрочную перспективу, так и в виде программы развития на ближайшие годы [1]. Федеральная целевая программа «Модернизация транспортной системы России» ставит серьезные задачи по развитию и модернизации транспортной инфраструктуры страны, требующие значительных бюджетных и привлеченных частных инвестиций на ее осуществление. Масштабность поставленных задач и сложившаяся непростая экономическая ситуация требуют особенно тщательного и детального обоснования эффективности инвестиций, что напрямую связано с корректностью расчетов параметров будущего объекта.

При принятии решения о строительстве либо реконструкции того или иного проекта оценивается не только эффективность вложений, но и риск их частичной или даже полной потери. В теории инвестиционных обоснований рассматриваются многие типы рисков: финансовые, политические, экологические и др. Тем не менее, определенной группе рисков не уделяется должного внимания, как и классу рисков, связанных с ошибочным прогнозированием транспортных потоков и соответственно с вытекающими из него ошибками в расчетах технологических параметров будущего объекта, таких как его производительность, мощность и степень загрузки отдельных устройств, простои транспортных средств и др. Необходимо изучить и понять природу этого класса рисков, чтобы снизить их негативные последствия. Особенно важным это является в проектировании создания таких долгосрочных и капиталоемких объектов транспортной инфраструктуры, какими являются морские порты.

Природа неопределенности в развитии портов

Прежде всего, необходимо отметить, что не существует единого понятия «порт». Порты всегда были разными и уникальными, поэтому на современном этапе существует множество систем их классификации и различных моделей развития [2]. Атрибуты, характеристики и параметры любого порта определяются его геополитическим положением, географическими характеристиками, иерархическим уровнем в логистической системе, развитостью наземных транспортных систем грузораспределения, структурой и размером хинтерленда, наличием подготовленного и потенциального контингента рабочей силы, предписанной роли в национальных и региональных планах развития, видом груза, достигнутой стадией развития в той или иной его модели, наличием средств и / или источников их привлечения, моделью владения и стратегическими планами ее смены.

Как не существует единого понятия «порт», так нет и единой процедуры анализа всех условий, управляющих факторов и возмущающих воздействий, гарантирующих достоверность получаемых результатов [3]. Несмотря на любые добросовестные попытки обеспечить научную обоснованность и доказательность методик. В основном это искусство заключается в выборе начальных предположений о характере экономического развития технико-экономических объектов, находящихся под управлением принимающих решения лиц и изменения внешней экономической среды, не находящейся в этом управлении. Если эти постулаты выбраны верно, то работа «машины» технологического и экономического проектирования обеспечивает желаемые результаты, если часть предположений ошибочна, то предсказать степень надежности результатов невозможно.

Методологической причиной существования рисков проектирования портов является высокая динамика и многофакторность рынка. Пользователи масштабных портовых инфраструктурных проектов не вооружены какой-либо более мощной экономической теорией или более изощренными методами многофакторного анализа, просто каждый из них действует в соответствии с примитивной экономической выгодой. Сложный характер поведения системы таких пользователей возникает как ансамбль многочисленных и разнообразных, но простых действующих причин.

Любой порт является лишь элементом транспортной системы. Целеполаганием этой системе служит принципиальное наличие пар спроса-предложения на определенные товары, которые обуславливают необходимость их транспортировки. Сама транспортировка является лишь вторичной функцией, которая может рассматриваться как предложение услуги перевозки в ответ на наличие спроса на нее [4]. Сложность здесь состоит в том, что порт может строиться как в ответ на уже существующую потребность в перевозках (реактивно) или генерировать спрос в ответ на отсутствующую до этого возможность (проактивно). По форме технико-экономические обоснования обоих вариантов могут быть близки, поскольку используемый математико-экономический аппарат один и тот же, но по сути они отличаются кардинально: *в первом случае вы оцениваете, что вам потребуется для реализации очевидно необходимого и потому гарантированно востребованного проекта и что вы за это получите, во втором случае вы скрупулезно подсчитываете затраты и выгоды проекта, который может оказаться никому не нужным вообще* [5].

Тем не менее как формальные, так и эвристические обоснования являются инструментами научного подхода, систематизирующего накопленные знания и приемы их использования. Неопределенность и изменчивость ключевых факторов такова, что любое обоснование варианта, казавшегося абсолютно достоверным и реализуемым, может «повиснуть в воздухе» и стать комплектом документов, описывающих забытый всеми проект, а любой экстравагантный проект в одночасье может стать очевидным для всех и вызывать недовольство промедлением в его реализации.

Методологические принципы прогнозирования и проектирования развития портов

С учетом ранее изложенного, любой проект строительства нового или развития существующего порта должен основываться на научном анализе всех указанных аспектов. Это должно быть выполнено как в отношении текущего (начального) и конечного (целевого) состояний, так и собственно процедуры перехода между этими состояниями в пространстве оцениваемых параметров. Процедура перехода состоит в формировании последовательности мер, ориентированных на постепенное сконцентрированное движение в выбранном направлении, выбор системы параметров управления и границ их значений, позволяющих принимать решение о достижении определенного состояния или этапа либо о необходимости пересмотра выбранной процедуры [6]. В большинстве случаев требуемый анализ предполагает выполнение нескольких описываемых далее этапов.

1-й этап — самоидентификация порта. Для определения начального положения порта, служащего отправной точкой процесса развития, устанавливающей его направление, необходимо произвести самоиндефикацию порта, под которой понимается его достоверное отождествление с конкретной фазой портового развития. Фаза портового развития идентифицируется по совокупности ключевых факторов, которые в целом дают картину состояния и положения порта на текущий момент.

В первую очередь, на этом этапе необходимо оценить и проанализировать существующие грузопотоки с точки зрения следующих параметров: типы и объемы грузов, используемые средства укрупнения, имеющиеся в порту технологии перегрузочных процессов, типы и размеры обрабатываемых в порту судов, частота их заходов. Анализ данных факторов дает понимание уровня развития порта как грузового центра и позволяет выявить его адекватность существующему грузопотоку и видам специализированных судов [7].

Далее на этом этапе необходимо оценить текущую роль порта как логистического звена в цепочках грузораспределения, существующих в регионе расположения порта. Для этого необходимо выполнить анализ производимого в хинтерленде и форленде объема валового продукта, а также определить уровень развития смежных видов транспорта. Кроме того, следует проанализировать географическую доступность порта и его взаимоотношения с прилежащим городом (городами) для понимания возможности экстенсивного роста порта в данном месте [8]. Самоидентификация порта не только дает возможность определить текущую фазу развития порта, что уже является достаточно ценным, но и позволяет выявить существующие проблемы, которые должны найти решение в процессе развития порта.

2-й этап — выбор целевого состояния развития порта. В первом приближении это решение связано с определением своевременности перехода порта в некоторую следующую фазу развития. Для постановки целей развития и реализации способов их достижения необходимо дать прогноз развития и оценить вероятный уровень воздействия на порт следующих основных факторов: прогнозируемого грузопотока через порт, а также хинтерленда и форленда.

Прогнозируемый грузопоток через порт. Здесь требуется ответить на следующие вопросы: какие виды и какое количество товаров будет проходить через порт, каким образом они будут упаковываться и перевозиться, каковы будут типы и частота заходов принимаемых портом судов. При этом следует отметить, что последствия от переоценки и недооценки грузопотоков неравнозначны. Например, постройка излишней инфраструктуры в большинстве случаев может привести лишь к незначительному росту стоимости перевалки груза, в то время как недостаток

инфраструктуры (например, причалов или перегрузочного оборудования) может вызвать задержки в грузообработке, ведущие к дополнительным серьезным расходам в виде штрафов за простой, а также другим расходам. Однако это отнюдь не означает, что всегда необходимо осуществлять «планирование с запасом», так как такое планирование приводит к ухудшению финансового результата и увеличению сроков окупаемости инвестиций [9]. Даже когда все существующие меры для получения реалистичного и мотивированного прогноза приняты во внимание, все равно остаются неопределенности, которые приводят к вариативности возможных объемов грузопотоков, особенно в том случае, когда развитие порта планируется на несколько десятилетий вперед.

Влияние хинтерленда и форленда. Это влияние должно быть обязательно учтено при планировании развития порта, для чего во внимание должны быть приняты следующие факторы:

– рост населения и изменение объема валового продукта;

– региональные планы развития;

– планы развития наземного транспорта;

– прогноза развития прибрежного судоходства и внутренних водных путей;

– возможное перераспределение грузопотоков в соседние порты;

– грузопоток, который государственные органы власти или региональные органы уже решили направить через порт.

3-й этап — прогнозирование развития технологии портовых перегрузочных процессов. В появлении новых технологий перегрузки груза обычно первоочередным является развитие флота как в технологическом аспекте, так и с точки зрения вместимости судов. К сложностям здесь следует отнести то, что момент принятия решения о портовых инвестициях в новую технологию наступает обычно намного раньше, чем получение твердого обязательства со стороны судовладельца о заходе специфического класса судов в порт. Это ведет к большой неопределенности о виде и составе будущего грузопотока, позволяя лишь строить предположения для технико-экономического обоснования инвестиций в конкретный тип портового оборудования [10].

4-й этап — оценка ожидаемой грузовместимости судов и количества судозаходов. Прогноз тоннажа, необходимого для каждого из основных классов грузов на каждом основном направлении, базируется на вероятных тенденциях развития перевозок и технологий грузообработки, которые транслируются в значение средней грузовой партии и количество судозаходов. Прогноз количества судозаходов и размера судов является важным в планировании будущей работы порта по следующим характеристикам:

– требуемая глубина на фарватере и у причалов;

– требуемая длина причалов;

– ожидаемая производительность;

– время обработки в порту по категориям судов;

– частота захода судов.

Следует учитывать, что прямая связь между объемом погрузки в порту (*так называемый размер судозахода*) и размером судна не всегда соблюдается. Практика показывает, что в линейном сервисе объем перевалки в крупных портах практически не зависит от грузоподъемности, в то время как на коротких фидерных рейсах чаще всего можно наблюдать относительно полную загрузку. Для трамповых балкерных судов значения этих параметров составляют 25 – 75 % от грузоподъемности, исключая основные специализированные и высокопроизводительные терминалы, где они обычно загружаются полностью [11]. Следует принимать во внимание и такой параметр, как минимальная загрузка, которая экономически оправдывает судозаход и будет зависеть от заходов в другие порты побережья.

Сценарно-событийный прогноз

Как следует из ранее изложенного, существует достаточно высокий уровень неопределенности в прогнозе тех сил и факторов, которые будут оказывать воздействие на порт в будущем, в связи с чем при проектировании развития конкретного порта нецелесообразно использовать традиционные

инерциальные методы. Для составления адекватного в целях развития порта прогноза необходимо рассматривать все факторы в совокупности и взаимодействии, поскольку только такая оценка может дать уверенность в правильности выбранной перспективы развития конкретного порта и позволит создать, обосновать и воплотить в жизнь концепцию развития. Различные сценарии и их события не должны быть привязаны к конкретным срокам или датам, они должны отражать внутреннюю логику развития экономического региона вокруг того или иного порта, учитывать возможную позитивную и негативную динамику изменения внешнеэкономического фона развития, национальные и региональные приоритеты и планы. В этих планах должны быть однозначно определены оцениваемые показатели, которые используются при управлении проектом развития, и значения показателей, свидетельствующие о переходе в следующую стадию реализации или полного пересмотра проекта.

Прогноз, основанный на изучении сценариев наступления тех или иных событий, изучается обычно путем моделирования некоторой бифуркационной ситуации, в которой учитывается воздействие на порт определенных сил, оказывающих существенное влияние на пути его развития. Моделирование вероятности наступления того или иного события для каждого порта и его последствий крайне индивидуально, его невозможно втиснуть в рамки какой-то одной стандартной модели, с одинаковой достоверностью моделирующей события для порта трансшипмента и небольшого туристического пассажирского порта. Тем не менее, это не отменяет использование единой методологии прогнозирования развития порта, основанной на сценарно-событийном прогнозе и учитывающей особенности каждого порта. В первую очередь, эта методология предполагает выбор модели, наиболее адекватной траектории и стадии его развития.

Несмотря на то, что выбор и ранжирование отслеживаемых показателей, наиболее важных и характерных для рассматриваемого порта, а также установление границ их изменения (калибровка модели) является ответственным этапом этого процесса, первостепенное значение приобретает установление именно *валидности модели*, т. е. отражение ею наиболее значимых для изучения характеристик моделируемого порта. Так, например, для того чтобы порт успешно развивался как центр трансшипмента (порт типа «hub»), ему недостаточно просто иметь физическую возможность принимать суда максимального размера, насыщать причальные фронты эффективным перегрузочным оборудованием, обеспечивать привычную международному бизнесу среду информационных технологий и коммерческо-правового подкрепления. Принятие решений подобного масштаба требует тщательного анализа геополитического положения порта относительно системы маршрутов мировой торговли, возможности его вовлечения в глобальные цепи поставок, обеспечение доверия к устойчивости политического и экономического ландшафта. Ярким примером такого проактивного прогнозирования и своевременности воплощения его в реальность является развитие порта Сингапур.



Рис. 1. Географическое положение порта Сингапур

Удобное стратегическое расположение этого порта в центре Юго-Восточной Азии, на пересечении основных судоходных маршрутов, помогло сделать порт Сингапур важным центром логистики и каналом товародвижения для всей мировой торговли (рис. 1). В настоящее время дан-

ный порт входит в число четырёх крупнейших в мире портов, наряду с Гонконгом, Роттердамом и Шанхаем. При этом по абсолютному тоннажу судов он удерживает первое место в мире с 1997 г., а по грузообороту — удерживал первое место до 2005 г., когда по этому показателю его обогнал порт Шанхай. Следует отметить, что последний является портом не трансшипмента, а портом исходящего грузопотока, т. е. портом «gate-way». Сегодня порт Сингапур обслуживает 250 регулярных линий и ежесуточно принимает около 150 судов. Кратко в цифрах история развития порта выглядит следующим образом (рис. 2):

1972 г. — первый контейнеровоз обработан в Сингапурском порту;

1982 г. — Сингапур становится самым крупным портом мира по тоннажу обслуженных судов, его контейнерооборот превышает 1 млн TEU в год;

1990 г. — контейнерооборот достигает 5 млн TEU в год, выводя его на первое место в мире;

2015 г. — контейнерооборот порта составляет 30,9 млн. TEU.

а) б)



Рис. 2. Развитие порта Сингапур:
а — порт в 60-е гг. XX в.; *б* — современное состояние порта

Другим примером идентификации и реализации потенциальных возможностей порта является развитие порта Гданьск, а именно терминала DCT. В настоящее время этот терминал является самым «отдаленным» в Балтийском море портом траншипмента, куда заходят крупнейшие контейнеровозы, осуществляющие сервис между Юго-Восточной Азией и Европой. Этапы развития контейнерного терминала DCT в Гданьске (рис. 3):

2007 г. — начало операционной деятельности;

2010 г. — старт еженедельного прямого контейнерного сервиса с Дальнего Востока;

2011 г. — начало обработки контейнеровозов класса «E» емкостью 15 500 TEU;

2013 г. — начало обработки контейнеровозов класса «Triple-E» емкостью 18 000 TEU.

а) б)



Рис. 3. Развитие терминала DCT, порт Гданьск:
а — строительство терминала (2005 г.); *б* — терминал в 2013 г.

Развитие терминала DCT может служить убедительным примером и стать темой серьезного исследования о направлении дальнейшего развития порта Калининград. Потенциально этот порт представляется как наиболее перспективный центр российского трансшипмента в Балтийском море. Данное предположение основывается на следующих факторах:

– географическое положение порта Калининград как самого западного порта России в регионе;

– геополитически прямой доступ к азиатскому рынку (в первую очередь, Китаю) и в перспективе к рынку Южной Америки;

– техническая и экономическая возможность захода контейнеровозов класса «Triple-E» в Балтийское море (доказана опытом работы терминала DCT в порту Гданьск).

Безусловно, в сформулированном виде это предложение является лишь гипотезой. Правильная оценка реального потенциала порта, тщательно выполненный многосторонний событийный анализ развития сил и факторов, воздействующих на порт, а также своевременно принятая и реалистичная программа развития порта могут не только полностью изменить транспортную систему в регионе расположения порта, но и затронуть мировой ландшафт перевозок, в кратчайшие сроки выведя порт в мировые или региональные лидеры.

Выводы

1. В методологии признается принципиальная невозможность получения достоверных исходных данных для планирования развития порта.

2. В качестве альтернативы предлагается использовать сценарно-событийный подход как методологию планирования развития портов.

3. Предложенная методология использует комплексный анализ всего пространства возможного развития основных факторов и уровня их влияния на порт в будущем, что позволяет применять ее практически к любым видам портов, находящимся в любой фазе развития.

4. Комплексное рассмотрение факторов позволяет всесторонне оценить потенциал портов, определить границы возможного развития грузопотоков, а также степень воздействия внешних сил, что дает возможность выбрать рациональные варианты развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2001 г. № 848 «О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» (с изм. и доп).

2. *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.

3. *Галин А. В.* Обобщенная имитационная модель процесса развития портов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 43–51.

4. Sustainable development strategies for cities and ports: monographs. — Geneva: UNCTAD, 1996. — 125 p.

5. *Кириченко А. В.* Заводы и порты: механика симбиоза / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Логистика: современные тенденции развития. — Ч. 1: материалы XV Международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 157–160.

6. *Галин А. В.* Разработка модели специализированного порта на основе приоритета грузопотоков / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 27–33.

7. *Галин А. В.* Воздействие ограничений на обобщенную имитационную модель процесса развития портов/ А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 7–14.

8. *Кириченко А. В.* Взаимоотношения города и порта: Эволюция и перспективы / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1 (50). — С. 12–15.

9. *Beresford A. K. C.* 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. — Is. 2. — Pp. 93–107. DOI: 10.1080/0308883042000205061.

10. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 c.
11. *Bird J.* Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF MODERN SEAPORT DEVELOPMENT

Based on the analysis of the characteristics and parameters proved the uniqueness of each port, it causes the presence of many of their development models. It explains the absence of a uniform test procedure conditions, controlling factors and disturbances, ensuring the adequacy of the choice of the direction of development of the port. It has been shown that any new construction project or development of the existing port must be based on scientific analysis of the current (initial) and final (target) state, and the transition between these states in the space of the parameters evaluated procedures. It was formulated methodological principles of forecasting and design of port development on the basis of scenario-event forecasting as an alternative to the traditional inertial methods. The findings are supported by examples of specific ports.

Keywords: port development, methodology, event forecast.

REFERENCES

1. Russian Federation. Government Resolution. 5 Dec. 2001 N 848 "O federalnoj celevoj programme "Razvitie transportnoj sistemy Rossii (2010-2020 gody)" (s izmenenijami i dopolnenijami).
2. Kuznetsov, A. L., and Galin A. V. "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.
3. Galin, A. V. "Generalized imitation model of ports development process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 43–51.
4. *Sustainable development strategies for cities and ports: monographs*. Geneva: UNCTAD, 1996.
5. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. "Plants and ports: mechanics symbiosis." *Logistika: sovremennye tendencii razvitija. Ch.1: materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.* SPb.: Federalnoe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovanija Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2016: 157–160.
6. Galin, A. V. "Development of a port specialization model based on the priority of cargo flows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 27–33.
7. Galin, A. V. "The restrictions effect on a generalized imitation model of the development process of ports." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 7–14.
8. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. "Interrelations between cities and ports: evolution and perspectives." *Transport of the Russian Federations* 1(50) (2014): 12–15.
9. Beresford, A. K. C., 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. DOI: 10.1080/0308883042000205061.
10. *Port development.* New York: UNCTAD, 1985.
11. Bird, J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кузнецов Александр Львович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *thunder1950@yandex.ru*	*Kuznetsov Aleksandr Lvovic* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *thunder1950@yandex.ru*
Галин Александр Валентинович — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *galin2403@gmail.com, galinav@gumrf.ru*	*Galin Aleksandr Valentinovic* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *galin2403@gmail.com, galinav@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61
УДК 519.68:15:681.5

В. М. Гриняк,
М. В. Трофимов,
В. И. Люлько

ОЦЕНКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА

Статья посвящена проблеме обеспечения навигационной безопасности движения морских судов. Рассматривается задача построения информационной системы, оценивающей параметры безопасного движения судна и обеспечивающей поддержку принятия решений по предотвращению опасного сближения судов. Представлены варианты модели многоуровневой оценки риска опасного сближения двух судов: дискретной модели, дающей оценку степени опасности ситуации типа «высокая», «средняя», «низкая» и непрерывной модели, базирующейся на идеях систем нечёткой логики. На основе сочетания этих моделей с классическим подходом построения «области манёвра» предложен новый способ визуализации множества опасных / безопасных скоростей и курсов движения судов. Проведены испытания разработанной системы на реальных данных трафика залива Находка, демонстрирующие применимость системы для оценки и представления параметров траектории безопасного движения судна в типичных ситуациях. Использование разработанного подхода для одновременной визуализации данных о движении «на берегу» и «на борту» даёт возможность согласовать действия оператора береговой системы управления движением судов и судоводителя.

Ключевые слова: управление движением судов, опасное сближение, траектория движения, маневрирование судна, нечеткая система.

Работа поддержана грантом РФФИ, проект 15-08-00234.

Введение

Навигационная безопасность коллективного движения судов является актуальной проблемой эксплуатации водных транспортных путей [1]. В ограниченных водах её обеспечение возложено на особый класс технических средств — береговые системы управления движением судов (СУДС), задачи которых реализуются с использованием измерительной информации, доставляемой радарами и спутниковыми средствами траекторных измерений — транспондерами автоматической идентификационной системы (АИС) [2], [3].

Движение морского транспорта имеет свою особую отраслевую специфику. В судоводительской практике считается, что каждая навигационная ситуация является по-своему уникальной и зависящей от множества факторов: соблюдения Международных правил предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72), правил судоходства на конкретной акватории, состояния водной среды (течение, волнение), погодных условий, а также характера движения других судов, находящихся на акватории и т. д. [1]. Кроме того, динамика судна как объекта, движущегося в жидкой среде, исключительно сложна. Поэтому береговые СУДС не являются системами управления судном в классическом понимании. Задачей СУДС является общая диспетчеризация движения путем выдачи оператором СУДС указаний (например, о снижении скорости или изменении полосы движения), а способ выполнения этих указаний выбирает капитан судна. Другими словами, СУДС является системой поддержки принятия решений [4].

В настоящее время в организационном плане развитие береговых СУДС идёт по пути интеграции с судовыми системами и береговыми службами. Концепция такой интеграции получила название *е-навигация* [5]. С точки зрения технических аспектов *е-навигации*, СУДС должны обеспечивать механизмы координации движения судов и работы соответствующих береговых служб, в том числе за счет представления комплексных данных и обмена ими в форматах, которые будут наиболее удобны и понятны операторам береговых служб, обеспечивающих безопасность движе-

ния. Одним из перспективных подходов к представлению навигационной информации в обсуждаемом контексте являются диаграммы типа «*скорость – курс*» [6], [7]. Они визуализируют данные об опасных и безопасных скоростях и курсах движения с точки зрения задачи «*судно – судно*». Классические диаграммы типа «*скорость – курс*» оперируют двухуровневой оценкой опасности типа «опасный / безопасный». В работах [8] – [10] и др. авторами исследовались модели экспертного оценивания степени опасности ситуации в задаче «*судно – судно*» с выделением множества уровней опасности типа «очень опасный / опасный / почти безопасный / и т. п.». Комплексирование традиционных диаграмм типа «*скорость – курс*» с разработанными многоуровневыми моделями оценки опасности ситуации представляет исследовательский и прикладной интерес. Известна работа [11], в которой предлагается наиболее близкий из известных аналог такого подхода, градации уровней опасности в нём обусловлены допустимым минимальным расстоянием между судами и правилами судоходства.

С учётом результатов, полученных авторами ранее, в настоящей статье предлагается альтернативный способ построения многоуровневых диаграмм типа «*скорость – курс*», который состоит в том, чтобы разделять уровни опасности на основе траекторных свойств движения судов. Это отвечает особенностям внешнего наблюдения береговой СУДС и характеру возложенных на неё задач. Рассматриваемая модель системы оценки степени опасности параметров движения судна позволяет обеспечить поддержку принятия согласованных решений операторами СУДС и судоводителями.

Основные модельные представления

При моделировании навигационной безопасности коллективного движения будем использовать традиционный подход — построение модели задачи «*судно – судно*» для каждой пары судов, что является обычной практикой [12] – [14]. Примем, что в качестве информационной базы СУДС используется приёмопередатчик автоматической идентификационной системы (АИС), передающий информацию GPS / ГЛОНАСС, а измерение траектории каждого судна включает в себя его координаты и компоненты вектора скорости.

Рассмотрим два судна с координатами $x^{(1)}, y^{(1)}$ и $x^{(2)}, y^{(2)}$ и скоростями: $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$ и $v_x^{(2)}, v_y^{(2)}$. Будем описывать их коллективное движение набором величин $\mathbf{s} = (r_x, r_y, v_x, v_y)$ — вектором состояния коллективного движения двух судов, где $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$, $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$ — компоненты вектора относительного положения судов $\mathbf{r}$, $v_x = v_x^{(1)} - v_x^{(2)}$, $v_x = v_x^{(1)} - v_x^{(2)}$ — компоненты вектора относительной скорости движения судов $\mathbf{v}$ (рис. 1).

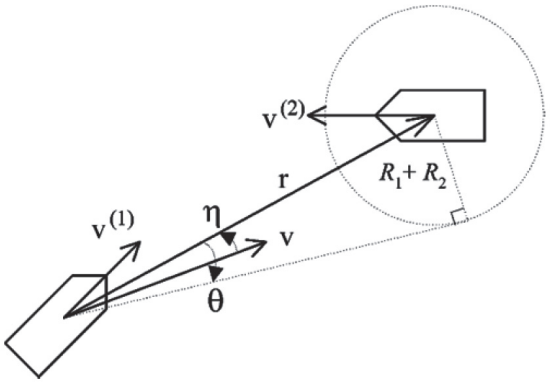


Рис. 1. Модель относительного движения пары «*судно – судно*»

Главным условием безопасного движения является недопущение опасного сближения судов, что обеспечивается соблюдением некой зоны навигационной безопасности вокруг судна, называемой также *корабельным доменом* [1]. В настоящей работе рассматривается корабельный домен статического типа, жёстко привязанный к судну с номером *n* и интерпретируемый окружностью

заданного радиуса R_n. Совокупность величин r_x, r_y, v_x, v_y свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов в случае выполнения следующих неформальных условий [15]:

– направление вектора скорости относительного движения судов таково, что вектор **v** находится внутри сектора, определяемого размером корабельного домена и расстоянием между судами;

– суда движутся прямолинейно и равномерно;

– время, оставшееся до максимального сближения судов, ниже допустимого.

Будем считать судно *1* управляемым судном. Переходя при определении потенциально опасного движения от относительного движения судов к абсолютному, будем иметь множество значений вектора скорости первого судна $\mathbf{v}^{(1)}$, соответствующих «опасным» значениям вектора **v** (заштрихованная область на рис. 2). Сектор, соответствующий потенциально опасным значениям скорости и курса судна *1*, получается путём параллельного переноса сектора «опасных» значений вектора **v** на вектор $\mathbf{v}^{(2)}$. Такая визуализация помогает оператору СУДС и судоводителю не только распознать потенциально опасную ситуацию, но и оценить возможности по предотвращению опасного сближения судов. Например, в данном случае следует либо уменьшить скорость судна *1*, либо изменить его курс таким образом, чтобы вектор $\mathbf{v}^{(1)}$ вышел из заштрихованной зоны. На рис. 2 с помощью окружности радиуса $\mathbf{v}^{(1)}_{\max}$ показаны максимально возможные значения скорости судна *1*.

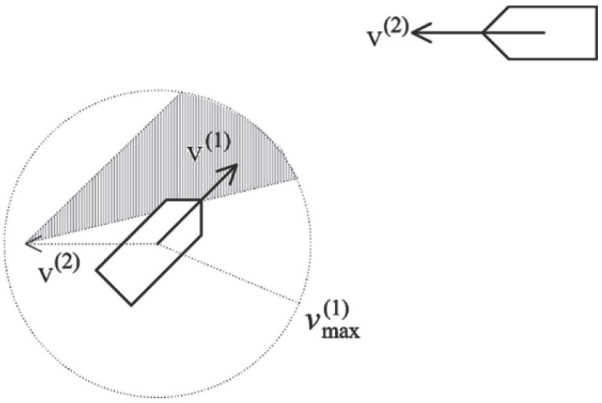


Рис. 2. Принцип построения диаграммы типа «*скорость – курс*»

Введем следующие величины (см. рис. 1): $|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ — расстояние между судами; $|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ — скорость относительного движения судов; $\theta = \arcsin\frac{R_1 + R_2}{|r|}$ — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами их доменов; $\eta = \arccos\frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r||v|}$ — угол между векторами **r** и **v**; $\frac{d|r|}{dt} = -\frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r|}$ — скорость изменения расстояния между судами; D – функция-детектор манёвра, причем если $D > 0$, то наблюдаемое судно маневрирует, если $D < 0$, то судно движется прямолинейно и равномерно (функция D может быть построена множеством известных способов, см., например, источник [8]); $T = -\frac{|r|^2}{r_x v_x + r_y v_y}$ — приближённое время, оставшееся до максимального сближения судов (необходимо доопределить функцию для случая относительно неподвижных судов).

Потенциально опасное сближение двух судов может быть формализовано следующим образом:

$$\eta < 0; \quad (1)$$

$$D < 0; \quad (2)$$

$$0 < T < T^*, \tag{3}$$

где T^* — пороговое значение.

Условия (1) и (2) формализуют опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов, условие (3) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового. В случае маневренного движения судов (при $D > 0$) примем, что маневрирование судна свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и его контроле над ситуацией [16]. Поэтому при внешнем наблюдении маневрирующие объекты характеризуются невысоким вербальным уровнем опасности.

С учётом ранее изложенного, будем иметь следующую систему правил для оценки степени опасности навигационной ситуации *и* в зависимости от истинности условий (1) – (3) — табл. 1, откуда видно, что степень опасности 0 (минимальная) соответствует безопасной ситуации; степень опасности 1 (средняя) — ситуации, когда суда могут опасно сблизиться, но при этом они маневрируют, т. е. судоводитель, скорее всего, контролирует ситуацию; степень опасности 2 (максимальная) — ситуации, при которой произойдет опасное сближение судов, если они не начнут манёвр уклонения.

Таблица 1

Система правил для дискретной оценки уровня опасности

Правило	Истинность условий			Степень опасности ситуации *и*
	(1)	(2)	(3)	
1	–	–	–	0
2	–	–	+	0
3	–	+	–	0
4	–	+	+	0
5	+	–	–	0
6	+	–	+	1
7	+	+	–	0
8	+	+	+	2

При реализации рассматриваемой модели на борту или в береговой СУДС множества значений вектора $\mathbf{v}^{(1)}$, соответствующие различным уровням опасности, визуализируются на соответствующей диаграмме «*скорость – курс*» различными способами (например, различным цветом или стилем).

Фаззификация задачи

Возможно представление степени опасности «*судно – судно*» в виде непрерывной величины. Для этого оказываются продуктивными идеи задач систем нечёткой логики [8] – [10]. В этом случае условия (1) – (3) представляются лингвистическими переменными с соответствующими термами и функциями принадлежности, а система правил (см. табл. 1) трансформируется в систему нечётких правил.

Рассмотрим интерпретацию задачи нечёткой системой типа Сугено. Введём отношение $f = \frac{\eta}{\theta}$ и соответствующую ей лингвистическую переменную P_f с термами «Big» («большое» — безопасная ситуация) и «Little» («малое» — опасная ситуация) и функциями принадлежности типа «дополнение»:

$$\rho_{\text{Little}}(f) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_f(f - c_f))};$$

$$\rho_{\text{Big}}(f) = \frac{1}{1+\exp(-a_f(f-c_f))},$$

где a_f, c_f — настраиваемые параметры.

Введём лингвистическую переменную P_D, определяющую характер движения судна с термами «Maneuverable» (маневренное) и «Constant» (равномерное) и функциями принадлежности типа «скачок»:

$$\mu_{\text{Maneuverable}}(D) = \frac{1+\text{sign}(D)}{2};$$

$$\mu_{\text{Constant}}(D) = \frac{1-\text{sign}(D)}{2},$$

где D — функция детектора манёвра.

Наконец, пусть лингвистическая переменная P_T описывает величину T (время, оставшееся до сближения) с термами «Little» («малое»), «Average» («среднее») и «Large» («большое») с функциями принадлежности типа «кластер»:

$$\nu_{\text{Little}}(T) = 1 - \frac{1}{1+\exp(-a_1^T(T-c_1^T))};$$

$$\nu_{\text{Average}}(T) = \exp\left(-\frac{(T-c_2^T)^2}{a_2^T}\right);$$

$$\nu_{\text{Large}}(T) = \frac{1}{1+\exp(-a_3^T(T-c_3^T))},$$

где a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T — настраиваемые параметры. Описание лингвистической переменной P_T тремя термами соответствует трем принятым в судоводительской практике значениям времени T [17]: времени, когда существует возможность принять только одно решение, которое поможет избежать столкновения (терм «Little»); времени, которое требуется для грамотного проведения оптимального маневра, когда уже можно начинать маневрирование, но еще есть время «исправить» результат ошибочного маневрирования, есть время на «вторую попытку (терм «Average»); времени, когда еще не нужно предпринимать какие-либо действия, так как ситуация может измениться (терм «Large»).

Величины f, D и T подаются на вход машины нечёткого вывода типа Сугено, на выходе которой формируется числовое значение $u \in [0, 2]$ — степень опасности навигационной ситуации «*судно – судно*»; значение $u = 0$ соответствует наименьшей степени опасности, $u = 2$ — наибольшей. Машина нечёткого вывода реализует систему нечётких правил (табл. 2).

Таблица 2

Система правил машины нечёткого вывода типа Сугено

Правило	P_f	P_D	P_T	Степень опасности ситуации u
1	Little	Maneuverable	Little	1
2	Little	Maneuverable	Average	0
3	Little	Maneuverable	Large	0
4	Little	Constant	Little	2
5	Little	Constant	Average	1
6	Little	Constant	Large	0
7	Big	Maneuverable	Little	0
8	Big	Maneuverable	Average	0
9	Big	Maneuverable	Large	0
10	Big	Constant	Little	0
11	Big	Constant	Average	0
12	Big	Constant	Large	0

Правило 1 табл. 2 соответствует ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, но судоводитель, скорее всего, уже начал маневр уклонения (средняя степень опасности). Правила 4 и 5 соответствуют ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если не начнут маневр уклонения (правило 4 соответствует высокой степени опасности). Обучение описанной нечёткой системы состоит в настройке параметров функций принадлежности и может быть проведено как экспертным способом, так и на обучающей выборке [18], [19]. Последний способ позволяет настроить параметры системы с учётом особенностей движения на конкретной акватории. Вместе с тем, формирование обучающей выборки для рассмотренной задачи является достаточно трудоёмким и требует привлечения экспертов. Поэтому здесь ограничимся только первым вариантом. При построении диаграммы «*скорость – курс*» множества значений вектора $\mathbf{v}^{(1)}$, соответствующие различным степеням опасности, визуализируются, например, различными оттенками цветов.

Результаты натурных испытаний системы

Примем, что функции принадлежности термов переменных P_f и P_T имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 3. Параметры a_f, c_f (см. рис. 3, *а*) выбраны так, чтобы учесть влияние ошибок измерений на определение отношения $f = \frac{\eta}{\theta}$; в идеале при $f < 1$ ситуация опасная, при $f > 1$ ситуация безопасная. Параметры a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T (см. рис. 3, *б*) отражают правила и особенности судоходства на конкретной акватории с точки зрения времени принятия решения и совершения манёвра уклонения.

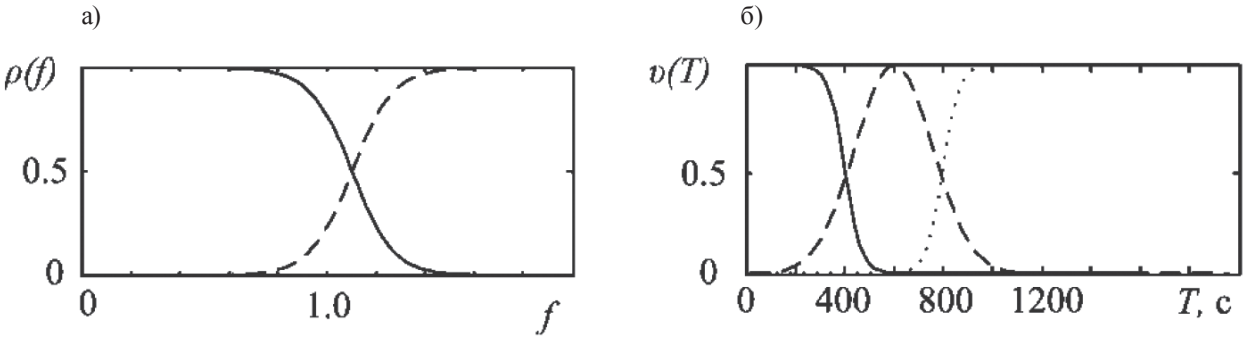


Рис. 3. Функции принадлежности термов переменных P_f (*а*) и P_T (*б*)
Условные обозначения: $\rho_{Litte}(f)$ — сплошная; $\rho_{Big}(f)$ — пунктир;
$\nu_{Litte}(T)$ — сплошная; $\nu_{Average}(T)$ — пунктир; $\nu_{Large}(T)$ — точки

Было проведено моделирование предлагаемой методики визуализации опасных и безопасных параметров движения судна на основе данных о реальном движении судов [20]. На рис. 4 показаны положения и скорости судов в заливе Находка. Красными кружками обозначены покоящиеся суда и суда, движущиеся прямолинейно и равномерно, жёлтыми — маневрирующие суда. Длина стрелки соответствует скорости движения судна, направление стрелки – курсу судна. «Выколотыми» синими кружками (*1 – 4* и *5*) показано моделируемое положение управляемых судов, для которых выполняется визуализация.

На рис. 5 показаны результаты визуализации опасных и безопасных возможных скоростей и курсов движения моделируемых управляемых судов *1 – 5* — рис. 4 (некоторые суда-цели, по которым также производился расчёт, находятся за границами рис. 4).

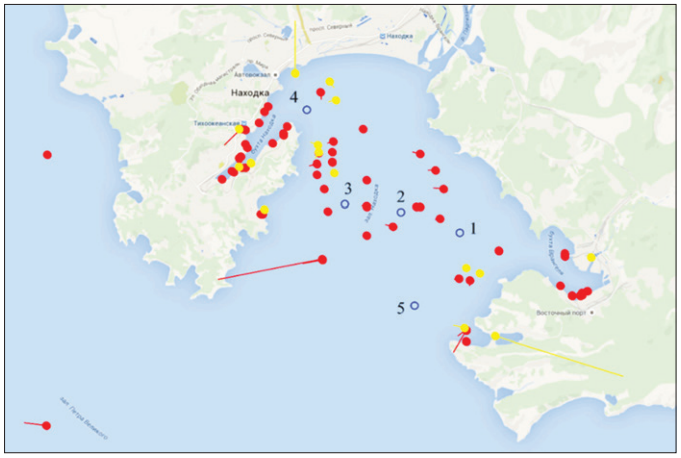


Рис. 4. Расположение судов в заливе Находка

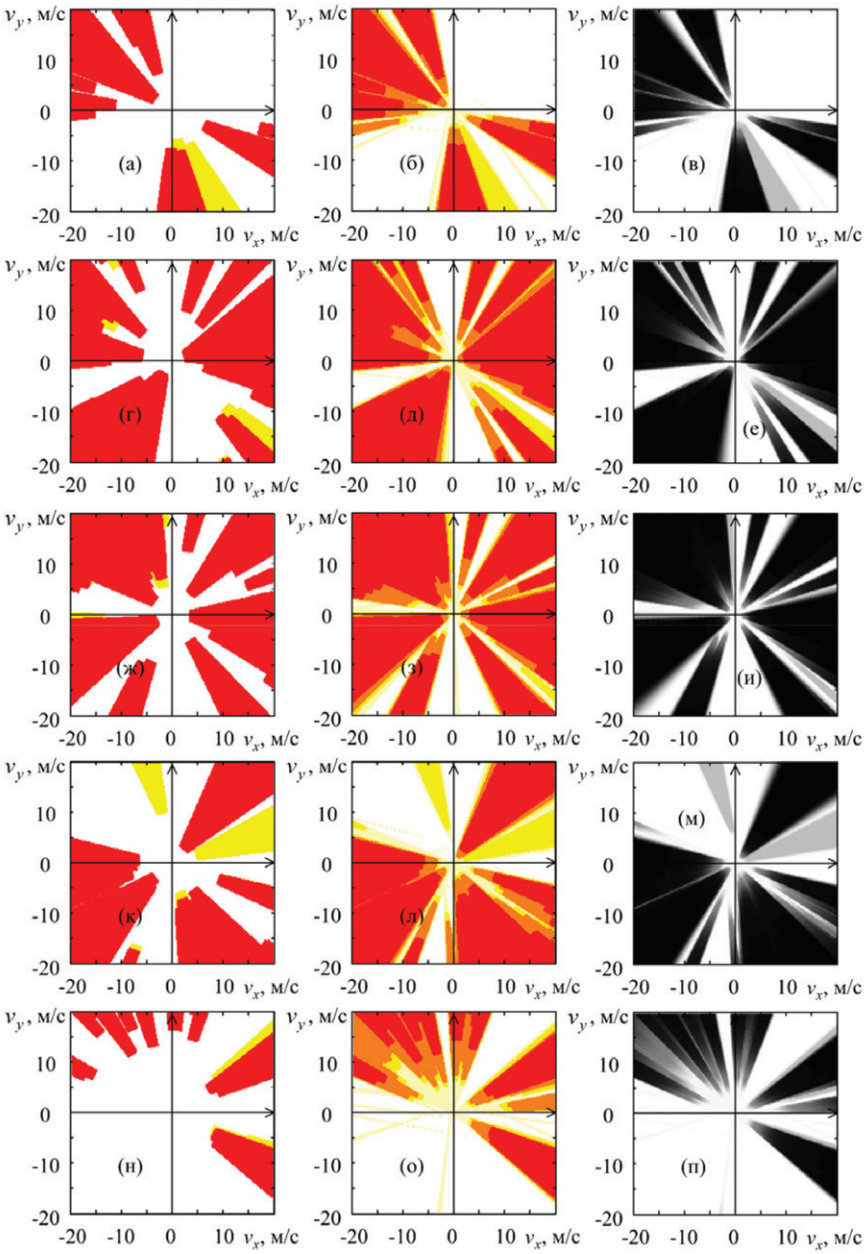


Рис. 5. Визуализация опасных и безопасных скоростей и курсов движения для навигационной ситуации рис. 4

Первая (горизонтальная) строка рисунков (см. рис. 5, *а – в*) соответствует судну *1*, вторая — судну *2* и т. д. При этом в первой колонке рисунков показаны значения компонентов вектора скорости моделируемого судна, соответствующие степени опасности 0 (белая зона), 1 (жёлтая зона) и 2 (красная зона), определенные упрощённой трёхуровневой моделью табл. 1 для порогового значения времени $T^* = 300$ с.

Во второй колонке приведены значения компонентов вектора скорости моделируемого судна, соответствующие различной степени опасности, определённые нечёткой системой типа Сугено, табл. 2 и функциями принадлежности, показанными на рис. 3. Значения цветов для различных уровней опасности варьируются (белый / бледно-желтый / ярко-желтый / оранжевый / красный).

Третья колонка аналогична второй, но уровень опасности показан различными оттенками серого цвета. Видно, что, например, для судна *3* окружающая навигационная обстановка такова, что безопасным является лишь движение курсом на юг (см. рис. 5, *ж – и*); для судна *4* безопасный выход из залива на юг сильно затруднён, хотя и возможен (см. рис. 5, *к – м*); для судна *5* вполне возможно безопасное движение в сторону пирса на юго-восток, но при этом скорость движения должна быть невелика (см. рис. 5, *и, о, п*).

В целом предлагаемая методика визуализации опасных и безопасных параметров движения управляемого судна применима как в береговых системах управления движением судов, так и в бортовой системе поддержки принятия решений, поскольку она позволяет решить задачу о выборе оператором СУДС и судоводителем той или иной траектории движения судна. Кроме того, по степени заполнения диаграммы «*скорость – курс*» элементами и насыщенности их цветов можно судить о психологической нагрузке на судоводителей в той или иной навигационной обстановке.

Выводы

1. В условиях высокой интенсивности трафика судоводителям и операторам СУДС требуются особые инструменты поддержки принятия решений. В работе предложен метод визуализации информации о навигационной обстановке на акватории, сочетающий в себе классические подходы Митрофанова [7] и Дегрэ, Лефевра [6] и комплекс математических моделей многоуровневой оценки риска опасного сближения судов [8] – [10]. Предложенный подход позволяет наглядно представлять информацию об опасных и безопасных параметрах движения судов на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя.

2. Одновременная визуализация полученных данных на берегу и на борту даёт возможность обеспечить согласованность действий оператора СУДС и судоводителя, что соответствует современной тенденции развития СУДС по пути углубления интеграции с судовыми системами и береговыми службами (*е-навигация*).

3. Разработанная модель представления информации о навигационной обстановке на акватории позволяет оценить эмоциональную нагрузку на судоводителей. Это открывает перспективную возможность постановки и решения задачи оценки степени опасности той или иной схемы движения конкретной акватории и выработки рекомендаций по изменению схемы движения в сторону менее опасных конфигураций.

4. Результаты работы ориентированы на расширение функций современных систем управления движением судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tam Ch. K.* Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 03. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.

2. *Акмайкин Д. А.* Совместное определение параметров цели с помощью судовой РЛС и транспондера АИС / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4. — С. 48–51.

3. *Сметанин С. И.* Способ реализации программной веб-части системы спутникового мониторинга / С. И. Сметанин, В. А. Игнатюк, А. А. Евстифеев // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 6. — С. 448–455.

4. *Hughes C. T.* When is a VTS is not a VTS / C. T. Hughes // Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 439–442. DOI: 10.1017/S0373463309005396.

5. *Малеев П. И.* Особенности, состояние и перспективы развития е-навигации морских объектов / П. И. Малеев, Н. И. Леденев // Навигация и гидрография. — 2012. — № 33. — С. 16–20.

6. *Degre T.* A collision avoidance system / T. Degre, X. Lefevre // Journal of Navigation. — 1981. — Vol. 34. — Is. 02. — Pp. 294–302. DOI: 10.1017/S0373463300021408.

7. *Mitrofanov O.* An anti-collision indicator / O. Mitrofanov // Journal of Navigation. — 1968. — Vol. 21. — Is. 02. — Pp. 163–170. DOI: 10.1017/S0373463300030319.

8. *Гриняк В. М.* Модель вероятностного типа для задачи предупреждения об опасном сближении морских судов / В. М. Гриняк, М. В. Трофимов // Транспорт: наука, техника, управление. — 2015. — № 10. — С. 18–22.

9. *Гриняк В. М.* Система экспертного оценивания состояния навигационной безопасности морской акватории на основе нейро-нечёткой сети / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Проблемы управления. — 2015. — № 4. — С. 58–65.

10. *Гриняк В. М.* Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 36–42.

11. *Szlapczynski R.* A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 06. — Pp. 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296.

12. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

13. *Некрасов С. Н.* Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 1–15.

14. *Смоленцев С. В.* Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 7–16.

15. *Дерябин В. В.* Исследование отказоустойчивости нейросетевой системы счисления пути судна / В. В. Дерябин // Транспорт: наука, техника, управление. — 2015. — № 9. — С. 46–51.

16. *Девятисильный А. С.* Информационно-технологические аспекты обеспечения безопасности движения на морских акваториях / А. С. Девятисильный, В. М. Дорожко, В. М. Гриняк // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. — 2003. — № 7. — С. 11–14.

17. *Коноплев М. А.* Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М. А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 2. — С. 34–39.

18. *Бобырь М. В.* Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы / М. В. Бобырь // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 28–35.

19. *Лелеков С. Г.* Нечёткий вывод в адаптивных таксономических экспертных системах / С. Г. Лелеков, А. М. Лях // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 12. — С. 890–895.

20. *Головченко Б. С.* Информационная система сбора данных трафика морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. — 2014. — № 8. — С. 24–28.

DATA VISUALIZATION OF SHIP COLLISION AVOIDANCE SYSTEM

Current paper is about system of safe movement parameters estimation for navigation during ships collective traffic. Vessel traffic system (VTS) does not a system of vessel navigation it is responsible for generation general orders for the water area and final maneuver actions are decided by vessel captain. VTS development leading toward integration with vessel control system and other coastal control services (e-navigation).

Diagrams "room-of-maneuver" (velocity-course) are promising way of representing navigation information.

There are usually 2 types of "danger situations" considered in terms of velocity-course diagrams. At this paper authors are continue working on creating multi-level velocity-course type diagrams based on their previous results. As input parameters for VTS output data of AIS and valuated path of each vessel at water area that are represented with coordinates and velocity vector. The safety defined with distance between the vessels (DCPA). Under the model of safety zone (domain) is constant and represented with given radius circle. Authors define navigation situation dangerous based on set of condition parameters such as: coordinates, velocity, side of safety domain, type of movement and time. The paper gives formalization for danger situation based on angle between relative speed vector and relative vector of vessel location, maneuver function and time till the maximum convergence. Discrete system rules is built for evaluation of danger navigation situations. Problem fuzzification reduced to two terms: "Big" and "Little" to determine danger situations. Terms "Maneuverable" and "Constant" introduces to determine values of maneuver function. Terms "Little", "Average", "Large" are given for the time estimation till maximum convergence. Sugeno type if fuzzy logic machine is used for lingual parameter processing, that gives [0,2] as an output. Authors gives the rules for definition of danger situation level in table format based on values of lingual parameters.

There are two ways of tuning the fuzzy logic machine are considered with this work: adjusting with experts, and self training with given learning dataset. The paper contains results of experimental modeling with visualization of safe/danger areas on velocity-course diagrams. Authors also complete numerical experiments for real navigation situation. There are graphical results of applying the model for the vessels at Nakhodka port water area.

Keywords: vessel traffic control, collision avoidance, trace, ship maneuver, fuzzy system.

REFERENCES

1. Tam, Ch. K., R. Bucknall, and A. Greig. "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters." *Journal of Navigation* 62.03 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134

2. Akmaykin, D. A., and D. B. Homenko. "Joint defining of target parameters by means of a ship radar station and 48 AIS transponder." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 48–51.

3. Smetanin, S. I., V. A. Ignatyuk, and A. A. Evstifeev. "Implementation of the Software Part of the System of Satellite Monitoring." *Information technologies* 21.6 (2015): 448–455.

4. Hughes, Captain Terry. "When is a VTS not a VTS?." *Journal of Navigation* 62.03 (2009): 439–442. DOI: 10.1017/S0373463309005396

5. Maleev, P. I., and N. I. Ledenev. "Specific Features, State and Prospects of Development for e-Navigation of Maritime Objects." *Navigation and hydrography* 33 (2012): 16–20.

6. Degre, T., and X. Lefevre. "A collision avoidance system." *Journal of Navigation*. 34.02 (1981): 294–302. DOI: 10.1017/S0373463300021408

7. Mitrofanov, O. "An anti-collision indicator." *Journal of Navigation* 21.02 (1968):P. 163–170. DOI: 10.1017/S0373463300030319

8. Grinyak, V. M., and M. V. Trofimov. "Probability model for ships collision risk assessment." *TRANSPORT: Science, Technology, Management* 10 (2015): 18–22.

9. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. "Sistema jekspertnogo ocenivanija sostojanija navigacionnoj bezopasnosti morskoj akvatorii na osnove nejro-nechjotkoj seti." *Control sciences* 4 (2015): 58–65.

10. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. "Fuzzy Logic Decision-making System for Ships Collision Avoidance." *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* 11(125) (2014): 36–42.

11. Szlapczynski, R., and J. Szlapczynska. "A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions." *Journal of Navigation* 68.06 (2015): 1041–1055. DOI: 10.1017/S0373463315000296

12. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.

13. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov, and K. I. Efimov. "Calculation of the guaranteed passing course at the danger of the close-quarters situation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15.

14. Smolencev, S. V. "Automatic synthesis of decisions on vessels collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 7–16.

15. Deryabin, V. V. "Fault tolerance research of neural network based vessel's dead reckoning model." *TRANSPORT: Science, Technology, Management* 9 (2015): 46–51.

16. Devjatisilnyj, A. S., V. M. Dorozhko, and V. M. Grinjak. "Informacionno-tehnologicheskie aspekty obespechenija bezopasnosti dvizhenija na morskih akvatorijah." *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* 7 (2003): 11–14.

17. Konoplev, M. A. "Fuzzy logic in determination of level of danger of collision." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2009): 34–39.

18. Bobyr, M.V. "Effect of number rule on training of fuzzy-logic systems." *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* 11 (2014): 28–35.

19. Lelekov, S. G., and A. M. Lyakh. "The Adaptive Fuzzy Inference System for Biological Taxonomy." *Information technologies* 12 (2015): 890–895.

20. Golovchenko, B. S., and V. M. Grinjak. "Informacionnaja sistema sbora dannyh trafika morskoj akvatorii." *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics* 8 (2014): 24–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриняк Виктор Михайлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»
victor.grinyak@gmail.com
Трофимов Максим Валерьевич — инженер.
ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»
bugzex@yandex.ru
Люлько Виктор Иванович —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»
viktor.lulko@vvsu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grinyak Victor Mihajlovich —
PhD, associate professor.
Far Eastern Federal University
victor.grinyak@gmail.com
Trofimov Maxim Valerevich — engineer.
Vladivostok State University of Economics and Service
bugzex@yandex.ru
Lulko Victor Ivanovich —
senior lecturer.
Vladivostok State University of Economics and Service
viktor.lulko@vvsu.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68
УДК 528.47

А. Б. Афонин,
Е. О. Ольховик,
А. Л. Тезиков

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОХОДНЫХ ГЛУБИН НА ТРАССАХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОДРОБНОСТИ СЪЁМКИ РЕЛЬЕФА ДНА

В работе даётся оценка гидрографической изученности трасс Северного морского пути (СМП). Приводятся основные характеристики высокоширотных и традиционных прибрежных трасс. Обобщены сведения о распределении глубин по акватории арктических морей. Отмечается, что навигация по СМП реализуется по рекомендованным маршрутам, что связано с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна. Тяжёлые ледовые условия вынуждают суда отклоняться от рекомендованных путей как при самостоятельном плавании, так и под проводкой ледокола из-за риска получения ледовых повреждений. Подчеркивается, что предельная осадка судна, вычисленная по минимальной обнаруженной на трассе глубине при дискретных измерениях, не гарантирует безопасного плавания на трассе. При увеличении дискретности уровень доверия к вычисленному значению предельной осадки судна уменьшается, так как вероятность наличия меньшей глубины, чем минимальная обнаруженная на трассе, возрастает. Предлагается оригинальная методика оценки проходных глубин трасс СМП и приведены примеры расчётов.

Ключевые слова: Северный морской путь, гидрографическая изученность, проходная глубина, осадка судна, минимальная глубина, подробность съёмки.

Введение

Северный морской путь (СМП) пролегает через Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, а также северо-восточную часть Баренцева и северную часть Берингова морей. Протяженность трасс СМП колеблется от 2700 миль для околополюсных до 3500 миль для прибрежных трасс. Общая протяженность трасс СМП превышает 14 тыс. миль. Вход на трассы СМП с запада осуществляется через пролив Карские Ворота или с севера от мыса Желания. Расстояние от порта Мурманск до пролива Карские Ворота составляет 528 морских миль, расстояние от порта Мурманск до мыса Желания — 758 морских миль. Вход на трассы СМП с востока осуществляется через пролив Дежнёва. Расстояние от мыса Дежнёва до порта Петропавловск-Камчатский составляет 1037 морских миль.

Арктические моря в основном мелководны, что подтверждается данными о распределении глубин по площади морей в табл. 1, а также данными работы [1]. В море Лаптевых и Восточно-Сибирском море глубины до 20 м занимают половину площади акватории и более. В Карском море эта доля достигает всего 9 %. По этим мелководным участкам пролегают основные традиционные прибрежные и высокоширотные трассы СМП.

Таблица 1

Распределение глубин по площади арктических морей

Диапазон глубин, м	Доля площади, %		
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море
0 – 10	3,5	11,1	14
10 – 20	5,3	37,4	47

Таблица 1
(*Окончание*)

20 – 30	10,1	22,7	25,5
30 – 40	9,3	17,8	13,1
40 – 50	3,8	11,0	–
50 – 100	18,3	–	–
100 – 200	146	–	–
> 200	214	–	–

Основу коллекции навигационных морских карт составляют карты, изготовленные по материалам гидрографических исследований, выполненных до 1990 г. Подробность выполненной съёмки рельефа дна показана в табл. 2 [1]. В коллекцию также входят карты, составленные по материалам гидрографических работ, выполненных ФГУП «Гидрографическое предприятие» (офиц. сайт — http://www.hydro-state.ru) с 2010 г. по настоящее время. Эти карты покрывают часть районов проектируемых транзитных высокоширотных трасс, а также акватории Обской губы и Енисейского залива с подходами [2].

Таблица 2

Распределение подробности съёмки рельефа дна по площади арктических морей

Подробность, м	Доля площади, %			
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
≤ 500	28	35	15	9
1000	38	39	20	-
2000 – 4000	16	11	14	21
≥ 4000	10	10	10	–
Маршрутный	8	5	41	70

Постановка задачи исследований

Трассы СМП в основном пролегают по участкам арктических морей с многочисленными подводными опасностями, через архипелаги Северная Земля и Новосибирские острова, по проливам Дмитрия Лаптева, Вилькицкого и Шокальского. Судоходство на акватории СМП осуществляется по рекомендованным путям. Существенного многолетнего опыта при прохождении данных трасс пока не накоплено, это относится как к периоду свободной навигации в чистой воде, так и при ледокольной проводке.

Представление о подводном рельефе акватории СМП основано на дискретных в плановом положении определениях глубин и их координат. Такой способ гидрографической съёмки не гарантирует обнаружение всех локальных поднятий дна, которые могут представлять собой навигационные опасности. Тяжёлые ледовые условия вынуждают суда отклоняться от рекомендованных путей как при самостоятельном плавании, так и под проводкой ледокола из-за риска получения ледовых повреждений. Значительное удаление от рекомендованных путей в условиях мелководья повышает риск аварий, связанных с посадкой на мель или касанием грунта в условиях недостаточной гидрографической изученности прилегающих акваторий.

В отчетных материалах [3] по транзитному переходу китайского судна «Yong Sheng» в период июль – август 2013 г. (при сопровождении ледокола «50 лет Победы») также отмечается недостаточная гидрографическая изученность акватории СМП. В частности, китайскими коллегами для обеспечения безопасности прохода были привлечены наиболее квалифицированные кадры компании COSCO и государственной морской администрации Китая, при этом отмечался высокий уровень качества услуг Администрации СМП и ФГУП «Атомфлот». Последний анализ

данного транзитного перехода представлен в работе [4], где предлагается использование многоуровневой системы выбора наиболее оптимальной трассы для транзита контейнерных грузов по СМП с совместным использованием данных по высокоширотным трассам, прибрежным и новым маршрутам.

Позиция по данному вопросу Крыловского государственного научного центра наиболее точно отражена в работе [5], где сделан вывод об экономической нецелесообразности контейнерных транзитных перевозок при загрузке судна в 500 TEU существующим флотом, а также предлагается постройка и использование ледокола-лидера мощностью 110 МВт, который может обеспечить 60-метровый канал для проводки судов с загрузкой не менее 3000 TEU. Однако при этом также надо учитывать, что использование ледокола-лидера не решает проблему недостаточной гидрографической изученности.

В работе В. С. Збаращенко [6] приводятся проектные расчеты арктической контейнерной линии по маршруту Мурманск — Петропавловск — Мурманск, при этом в качестве расчетного судна рассматривается контейнеровоз ледового класса ARC7 вместимостью до 2000 TEU и осадкой 10 – 11 м, а также отмечается, что при условии круглогодичной навигации и двухнедельной частоты линейного сервиса данные грузоперевозки не смогут составить конкуренцию южному маршруту через Суэцкий канал. Следует отметить, что предельная осадка судна, вычисленная по минимальной обнаруженной на трассе глубине при дискретных измерениях, не гарантирует безопасного плавания на трассе. При увеличении дискретности уровень доверия к вычисленному значению предельной осадки судна уменьшается, так как вероятность наличия глубины, меньшей, чем минимальная обнаруженная на трассе, возрастает.

Изученность этих трасс соответствует требованиям стандартов, действующих на момент съёмки, и обеспечивает плавание судов с осадкой до 6 – 7 м в условиях летне-осенней навигации. В период зимней навигации при ледокольной проводке безопасность транспортных судов обеспечивалась впереди идущим ледоколом, имеющим осадку 8 м или 12 м [7] – [9].

Следует отметить, что гидрографическая изученность акватории СМП по современным критериям Международной гидрографической организации [10] является недостаточной. Согласно этим критериям, на трассах СМП необходимо выполнить гидрографическую площадную съёмку, обеспечивающую выявление навигационных опасностей размерами 1×1 и 2×2 м в зависимости от запаса воды под килем судна [11]. В настоящее время таким условиям отвечают транзитные высокоширотные трассы СМП в пределах двухкилометровой полосы и подходы к портам Дудинка и Сабетта.

Прибрежные трассы СМП «оплаваны» мелкосидящими судами. Эксплуатация на прибрежных трассах судов с большой осадкой без дополнительного гидрографического обследования сопряжена с рисками навигационных происшествий. Плавание по рекомендованным путям осуществляют в районах с недостаточной гидрографической изученностью согласно правилам Администрации СМП [12]. Мелководье в сочетании со сложными ледовыми условиями Арктики являются основными осложняющими факторами круглогодичной навигации крупнотоннажных судов по СМП.

Разработка методики для оценки проходных глубин на трассах СМП

Предельная осадка судна, вычисленная по минимальной обнаруженной на трассе глубине при дискретных измерениях, не гарантирует безопасного плавания на трассе. При увеличении дискретности уровень доверия к вычисленному значению предельной осадки судна уменьшается, так как вероятность наличия глубины, меньшей, чем минимальная обнаруженная на трассе, возрастает.

Оценка предельной осадки судна $d(L)$, гарантирующей безопасность плавания по трассам на мелководье в условиях недостаточной гидрографической изученности ($L \neq 0$), определяется по формуле

$$d(L) = f[Z_{\min}(p), \Delta, \Delta L(p; L)], \quad (1)$$

где L — дискретность измерений глубин; $Z_{\min}(p)$ — минимальная глубина, определённая с вероятностью p; Δ — принятый запас воды под килём; $\Delta_L(p; L)$ — поправка за неопределённость значения минимальной глубины, учитывающая морфологические и морфометрические особенности подводного рельефа, его тип и диапазон глубин акватории.

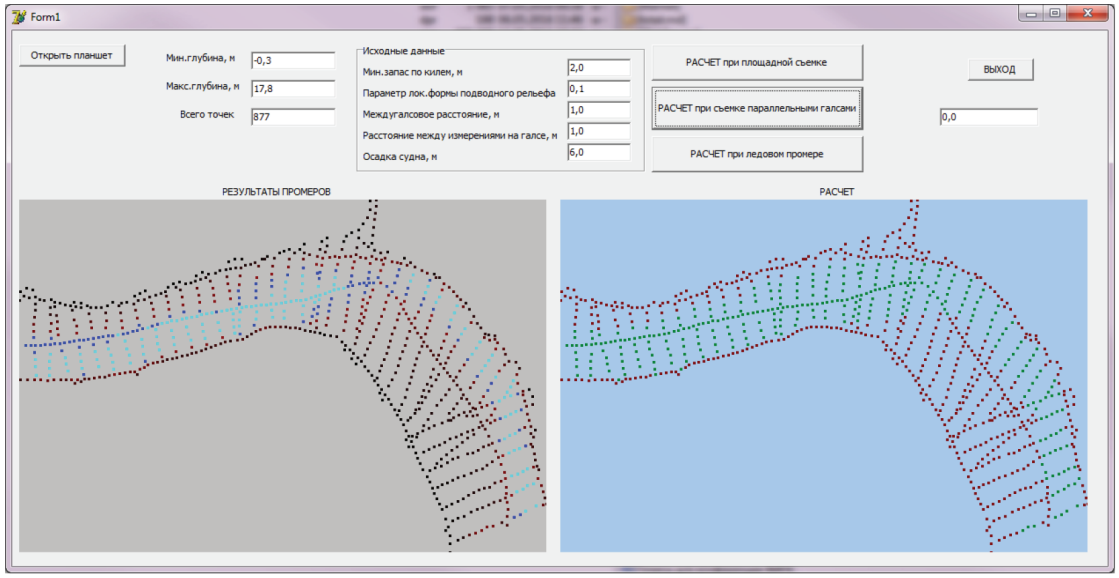
Для площадной съёмки справедливы соотношения:

$$\Delta_L(p = 1; L \to 0) = 0; \tag{2}$$

$$d(L \to 0) = f[Z_{\min}(p = 1), \Delta]. \tag{3}$$

Формулы (1) – (3) использованы для расчёта предельных осадок судов на трассах СМП. Для автоматизации расчетов была разработана программа ЭВМ для расчета предельной осадки судна, предназначенная для следующих видов гидрографической съемки подводного рельефа: площадной съемки, съемки параллельными галсами, ледового промера и маршрутного промера. Использование программы возможно как для научных, так и для учебных целей, импорт данных планшетов съемки выполняется из текстового файла, содержащего координаты промеров глубин. Тип реализующей ЭВМ — IBM PC-совместимый персональный компьютер. Язык программирования — ObjectPascal (среда разработки — Lazarus, Delphi). Вид и версия операционной системы — Windows 2003/XP/7, Linux (Ubuntu).

На рисунке приведены результаты расчетного определения проходных глубин, соответствующих предельной осадке судна 6,0 м. Верхнее окно отображает основные параметры исходного массива глубин, в левом окне отображён исходный массив глубин, в правом — область проходных глубин. Данная методика использовалась для оценки проходных глубин на трассах СМП [8].



Расчетные проходные глубины для судна с осадкой 6 м

В табл. 3 приведены характеристики высокоширотных трасс СМП, обследованных в период 2010 – 2015 гг. методом площадной съёмки. Площадная съёмка обеспечивает достаточную гидрографическую изученность акватории высокоширотных трасс [10]. В первой графе указаны прямые и обратные курсы прямолинейных участков рекомендованного пути [2]. Во второй графе приведены минимальные глубины, обнаруженные на выделенных прямолинейных участках рекомендованного пути. Площадная съёмка позволила обнаружить минимальные глубины и все имеющиеся подводные препятствия, опасные для судоходства. В третьей графе приведены значения проходных глубин, причем проходные глубины отличаются от минимальных на величину свободного запаса воды, равного 2,0 м. В четвертой графе указан вид проведения съемки.

Таблица 3

Характеристики высокоширотных трасс

Курс (прямой — обратный)	Минимальная глубина, м	Проходная глубина, м	Подробность съёмки
Западная часть			
36,2 – 216,2	44	42	Площадная съёмка
74,5 – 254,5	25	23	Площадная съёмка
90 – 270	45	43	Площадная съёмка
56,4 – 236,4	27	25	Площадная съёмка
65,6 – 245,6	35	33	Площадная съёмка
Средняя часть			
53,1 – 233,1	24	22	Площадная съёмка
90 – 270	19	17	Площадная съёмка
61,3 – 241,3	21	19	Площадная съёмка
94 – 274	23	21	Площадная съёмка
53,1 – 233,1	24	22	Площадная съёмка
Восточная часть			
106,2 – 286,2	22	20	Площадная съёмка
132,5 – 312,5	22	20	Площадная съёмка
137,7 – 317,7	20	18	Площадная съёмка
119 – 299	28	26	Площадная съёмка

В табл. 4 приведен характерный фрагмент прибрежной трассы СМП и его основные параметры.

Таблица 4

Характеристики фрагмента прибрежной трассы

Выход из проливов Вилькицкого и Шокальского				
Курс (прямой – обратный)	Протяжённость, км	Глубины (мин./макс.), м	Проходная глубина, м	Подробность съёмки (междугалсовое расстояние L, м)
112,4 – 292,4	102	25/66	15,0	500
126,4 – 306,4	194	18/60	6,0	1000
0 – 180	104	20/185	2,0	2000

Следует обратить внимание, что расхождение между минимальными и проходными глубинами возрастает при уменьшении подробности съёмки (увеличении параметра L), а оценка вероятности пропуска опасных глубин, которая также имеет зависимость от дискретности съемки, может быть выполнена по методике [13].

Выводы

1. Разработаны методики для оценки проходных глубин на трассах СМП, которые учитывают как гидрографическую изученность трасс, так и морфологические и морфометрические особенности подводного рельефа.

2. Расчетные данные позволяют оценить возможную минимальную осадку судна в целях обеспечения безопасности мореплавания и выявления более оптимальных маршрутов, что является актуальным при разработке новых маршрутов СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Решетняк С. В.* Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.

2. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: http://www.hydro-state.ru/ (дата обращения: 23.06.2016).

3. *Zhao H.* Study on Economic Evaluation of Northern Sea Route: Taking Voyage of Yong Sheng as an Example / H. Zhao, H. Hu // Transportation Research Board 95th Annual Meeting. — 2016. — № 16-6420.

4. *Zhao H.* Study on China-EU container shipping network in the context of Northern Sea Route / H. Zhao, H. Hu, Y. Lin // Journal of Transport Geography. — 2016. — Vol. 53. — Pp. 50–60. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.01.013.

5. Тимофеев О. Я. «Лидер» вместо «Ленина» / О. Я. Тимофеев // Военно-промышленный курьер. — 2016. — № 6 (621) — (доступ с экрана – http://vpk-news.ru/articles/29216).

6. *Збаращенко В. С.* Арктическая контейнерная линия Мурманск – Петропавловск – Мурманск / В. С. Збаращенко // Вторая международная конф. «Транспорт и логистика в Арктике – 2016». — 2016. — С. 61–67.

7. *Баталин Г. А.* Навигационно-гидрографическое обеспечение мореплавания в арктическом регионе / Г. А. Баталин, С. В. Решетняк // Морской флот. — 2008. — № 3. — С. 34–38.

8. *Дмитриев А. А.* История мореплавания по трассе Северного морского пути в XX и начале XXI века / А. А. Дмитриев, Ю. А. Горбунов, В. Т. Соколов. — СПб.: Морская энциклопедия, 2015. — Т. III. — 304 с.

9. Разработка методов прогноза типов ледовых условий в юго-западном и северо-восточном районах Карского моря в зимний период: отчёт о НИР / ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова; отв. исполн. А. Б. Афонин. — СПб., 2015. — 101 с. — № ГР 115101370010.

10. Стандарт Международной гидрографической организации S-44/5. — Монако, 2008.

11. Оценка влияния навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий на судоходство по Северному морскому пути: отчёт о НИР / ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова; отв. исполн. А. Б. Афонин. — СПб., 2016. — 50 с.

12. АСМП. Правила плавания по СМП [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/pravila_plavaniya/ (дата обращения: 23.06.2016).

13. *Афонин А. Б.* Особенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа / А. Б. Афонин, С. А. Лутков, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 90–95.

DEVELOPMENT OF THE ASSESSMENT METHODS OF ANADROMOUS DEPTHS ON THE NORTHERN SEA ROUTE DEPENDING ON THE DETAIL OF SURVEY OF THE BOTTOM RELIEF

In work the assessment of hydrographic study of routes of the Northern Sea Route (NSR) is given. The main characteristics of high-altitude and traditional coastal routes are provided. In article data on distribution of depths on the water area of the Arctic seas are generalized. It is noted that navigation on SMP is realized along the recommended routes that is connected with insufficient hydrographic study of a relief of a bottom. Severe ice conditions force vessels to deviate from the recommended ways, both at independent swimming, and under conducting of the ice breaker because of risk of ice damages receiving. The extreme draft of the vessel calculated on the minimum depth found on the route at discrete measurements doesn't guarantee safe swimming on the route. At increase in discretization the level of credibility to the calculated value of extreme draft of the vessel decreases as the probability of presence of depth, smaller, than minimum found on the route, increases. The original technique of an assessment of depths through passage of routes NSR is offered and examples of calculations are given.

Keywords: Northern Sea Route, hydrographic study, depth through passage, vessel draft, minimum depth, shooting detail.

REFERENCES

1. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic sees underwater relief of Russia." *Geodesy and Cartography* 4 (2006): 57–60.

2. FGUP «Gidrograficheskoe predprijatie». Web. 23 June 2016 <http://www.hydro-state.ru/>.

3. Zhao, Hui, and Hao Hu. "Study on Economic Evaluation of Northern Sea Route: Taking Voyage of Yong Sheng as an Example." *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*. No. 16-6420. 2016.

4. Zhao, Hui, Hao Hu, and Yisong Lin. "Study on China-EU container shipping network in the context of Northern Sea Route." *Journal of Transport Geography* 53 (2016): 50-60. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2016.01.013.

5. Timofeev, O. Ja. "«Lider» vmesto «Lenina»." *Voenno-promyshlennyj kur'er* 6(621) (2016).

6. Zbarashhenko, V. S. "Arkticheskaja kontejnernaja linija Murmansk – Petropavlovsk – Murmansk." *Vtoraja mezhdunarodnaja konferencija «Transport i logistika v Arktike – 2016»*. M., 2016: 61–67.

7. Batalin, G., and S. Reshetnyak. "The navigational and hydrographic support for shipping in the Arctic region." *Marine Fleet* 3 (2008): 34–38.

8. Dmitriev, A. A., Ju. A. Gorbunov, and V. T. Sokolov. *Istorija moreplavanija po trasse Severnogo morskogo puti v HH i nachale HHI veka*. Vol. III. SPb.: Morskaja jenciklopedija, 2015.

9. Razrabotka metodov prognoza tipov ledovyh uslovij v jugo-zapadnom i severo-vostochnom rajonah Karskogo morja v zimnij period: otchjot NIR № G/r 115101370010; Otv. Isp. A.B. Afonin. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2015.

10. Standart Mezhdunarodnoj gidrograficheskoj organizacii S-44/5. Monako, 2008.

11. Ocenka vlijanija navigacionno-gidrograficheskih i gidrometeorologicheskih uslovij na sudohodstvo po Severnomu morskomu puti: otchjot o NIR; Otv. Isp. A.B. Afonin. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2016.

12. ASMP. Pravila plavanija po SMP. Web. 23 June 2016 <http://www.nsra.ru/ru/pravila_plavaniya/>.

13. Afonin, A. B., S. A. Lutkov, and A. L. Tezikov. "Features creation of depth contours in the conditions of insufficient hydrographic study of the seabed." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 90–95.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Афонин Андрей Борисович — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *andrey.afonin.gma@yandex.ru, kaf _gm@gumrf.ru* *Ольховик Евгений Олегович* — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *olhovikeo@gumrf.ru* *Тезиков Александр Львович* — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru*	*Afonin Andrej Borisovich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *andrey.afonin.gma@yandex.ru, kaf _gm@gumrf.ru* *Ol'hovik Evgenij Olegovich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *olhovikeo@gumrf.ru* *Tezikov Aleksandr L'vovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74
УДК 528.47

В. В. Клюев

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Статья посвящена проблеме разработки формализованной оценки безопасности (ФОБ) акватории Северного морского пути (СМП), принципы которой сформулированы в документах Международной морской организации. В работе приведены результаты анализа публикаций, посвященных разработке ФОБ на морском транспорте. Отмечены основные недостатки метода экспертных оценок, используемого большинством авторов публикаций при определении вероятности нежелательного события и риска навигационных аварий. Предложен альтернативный метод вычисления указанных параметров, основанный на теории геометрических вероятностей. В качестве меры навигационной безопасности акватории автор использует вероятность пересечения пути судна с навигационной опасностью. Дано описание обобщённой модели ледяных полей и отмелей, представляющих основную угрозу для мореплавания на СМП. Установлены критерии и взаимосвязь основных количественных характеристик навигационных опасностей с осадкой судна, его шириной, скоростью и ледовой проходимостью. Проверку формализации оценки безопасности акватории СМП, на основе на разработанного автором метода, планируется выполнить с использованием материалов, относящихся к действующим судоходным трассам.

Ключевые слова: Северный морской путь, формальная оценка безопасности, ледовое поле, мелководье, модель опасности, мера опасности.

Северный морской путь (СМП) как морская транспортная магистраль имеет существенные особенности, оказывающие влияние на безопасность навигации по сравнению с остальными транспортными путями мира. Тема оценки безопасного плавания по СМП приобретает особую актуальность в связи с повышением интенсивности судоходства, увеличением тоннажа судов и разработкой перспективных программ круглогодичного использования СМП [1] – [5]. Комитеты морской безопасности и защиты морской окружающей среды при Международной морской организации (ИМО) в 1997 г. одобрили Временное руководство по применению концепции Формальной оценки безопасности (ФОБ) [6]. Концепция содержит общие принципы обеспечения безопасной эксплуатации судна, включающие защиту жизни и здоровья людей, окружающей среды и собственности. Анализ публикаций, посвященных ФОБ на морском транспорте, показывает, что они в основном делятся на две группы.

К первой группе относятся работы, посвященные методологии ФОБ [7] – [9].

Во вторую группу входят работы, посвященные разработкам комплексных оценок безопасности транспортных перевозок, направленных на снижение аварийности на морском транспорте, связанной с человеческим фактором, навигационной аварийностью, а также надежностью судовых систем и установок [10] – [15]. Все работы имеют исследовательский характер и направлены на формирование подходов и аппарата описания и реализации принципов ФОБ, общих для всех морских путей мира.

Особенности арктической навигации, такие как низкие температуры, ледовитость, обширные мелководья, малая гидрографическая изученность арктических морей в целом, относительно слаборазвитая инфраструктура поиска и спасения, учтены при разработке Полярного кодекса [16], в основу которого также заложены принципы ФОБ. Первым и основополагающим этапом ФОБ является идентификация и описание опасностей, приводящих к развитию опасных ситуаций [6]. В основе ФОБ лежит оценка вероятности развития опасных ситуаций по конкретным сценариям P и связанной с ними тяжестью последствий Q. (Параметр Q в данной работе не рассматривается).

Произведение параметров P и Q определяет риск нежелательного события:

$$r = PQ. \quad (1)$$

В формуле (1) параметр P имеет смысл вероятности или частоты нежелательного события. С практической точки зрения вычисление параметра P представляет определенные сложности, связанные с проблемой испытаний и с конечным числом исходов, включаемых в статистическую выборку, или полным отсутствием статистической выборки [17]. Для преодоления этого затруднения рекомендуется использовать либо экспертные оценки величины параметра P, либо процедуры, связанные с вычислением геометрических вероятностей [18] (те и другие имеют свои недостатки и ограничения).

Метод экспертных оценок относится к инструментарию количественной оценки альтернатив в условиях слабо формализуемой проблемной ситуации. Главный недостаток экспертных оценок состоит в невозможности получить оценку точности оцениваемого параметра. Геометрические вероятности позволяют точно и объективно определить параметр P, однако для этого задачу вычисления отношения числа событий требуется преобразовать в задачу попадания точек или прямых в определенную область. Для арктического мореплавания основными навигационными опасностями являются лёд и мели.

В качестве меры нежелательного события предлагается использовать вероятность пересечения маршрута судна с опасностями. Модель обособленной опасности задаётся в следующем виде:

$$R = R\,[k_1, k_2, k_3, ..., k_n], \tag{2}$$

где R — геометрический размер и форма навигационной опасности; k_1, ..., k_n — аргументы функции R, описывающие параметры навигационной опасности.

С учетом того, что большинство навигационных задач на практике решается на навигационных морских картах, целесообразно представить обособленные опасности их плоскими контурами. Такое преобразование может быть выполнено соответствующим заданием аргументов функции (2). При описании ледового поля модель (2) приобретает вид

$$R = R\,[x(t), y(t), h(t), t]\ ,. \tag{3}$$

где $x(t)$, $y(t)$, $h(t)$ — плановые координаты ледового поля и его толщина, зависящие от времени t.

При переходе от общей модели (2) к частной модели (3) выполнена замена аргументов $k_1 = x(t)$, $k_2 = y(t)$, $k_3 = h(t)$, $k_4 = t$. Толщина ледового поля, изменяющаяся во времени, описывается параметром $h(t)$. Таким образом, модель (3) описывает ледовое поле, которое может во времени менять свою форму и размеры, толщину и плановое положение. Эта модель может использоваться для описания локального ледяного поля, ледяных торосов, айсбергов и других ледовых образований льда. Сплошное ледовое поле в модели (3) соответствует условию $R \to \infty$, а отсутствие льда — условию $R \to 0$. Ледовое поле (3), представляющее опасность для судна, имеющего класс ледового усилением W, задается множеством

$$R_0^h = R\,[x(t), y(t), h(t) > h_{cr}(W), t]. \tag{4}$$

Критическая толщина льда $h_{cr}(W)$ установлена Правилами Российского морского регистра судоходства [19] в зависимости от ледового класса судна. Для арктических категорий судов (Arc4 – Arc9) допустимые значения характеристик и толщины льда, при которых судно способно идти в канале за ледоколом с малой скоростью (3 – 5 уз), не подвергаясь повышенному риску получения повреждений в результате взаимодействия корпуса со льдом, приведены в следующей таблице [19].

Допустимые значения характеристик и толщины льда, при которых судно способно идти в канале за ледоколом с малой скоростью

Категория судна	Допустимые тип и толщина льда	
	Зимне-весенняя навигация	Летне-осенняя навигация
Arc4	Тонкий однолетний	Средний однолетний до 0,9 м
Arc5	Средний однолетний до 0,8 м	Средний однолетний

Таблица
(*Окончание*)

Arc6	Средний однолетний	Толстый однолетний
Arc7	Толстый однолетний до 1,8 м	Двухлетний
Arc8	Многолетний до 3,4 м	Многолетний
Arc9	Многолетний	Многолетний

Примечание. Классификация льдов принята согласно «Номенклатуре морских льдов» Всемирной метеорологической организации («Sea Ice Nomenclatture» of the World Meteorological Organization (WMO)):

Тип льда:	*Толщина льда*:
многолетний	> 3,0 м
двухлетний	> 2,0 м
толстый однолетний	> 1,2 м
средний однолетний	0,7 – 1,2 м
тонкий однолетний	< 0,7 м

При описании локального поднятия морского дна модель (2) приобретает следующий вид:

$$R = R[x, y, z], \tag{5}$$

где x, y — плановые координаты локального поднятия.

Распределение глубин в границах локального поднятия описывается параметром z. Таким образом, модель (5) описывает поднятие морского дна, которое во времени не меняет своего планового положения и форму.

Поднятие дна в модели (5) считается опасным для судна с осадкой d, если

$$R_0^d = R[x, y, z < z_{пр}(d)]. \tag{6}$$

В формуле (6) $z_{\text{пр}}(d)$ соответствует значению предельной проходной глубины для судна с осадкой d. Для судов с осадками d_1 и d_2 справедливы соотношения: если $d_1 > d_2$, то $R_0^{d1} > R_0^{d2}$, т. е. суда, имеющие большую осадку, в большей степени стеснены на мелководье.

В районе плавания в общем случае может находиться множество опасностей вида $\{R_0^h\}$ и / или $\{R_0^d\}$. Сведения о наличии и свойствах опасностей, принадлежащих множествам $\{R_0^h\}$ и $\{R_0^d\}$, содержатся на ледовых и навигационных морских картах соответственно.

В период летне-осенней навигации опасности вида $\{R_0^h\}$ — льды — могут сокращаться вплоть до полного исчезновения. В зимне-весеннюю навигацию множество $\{R_0^h\}$ достигает максимальной величины [20]. Отношение совокупной площади ледяного покрова к общей площади акватории представляет собой одну из важнейших навигационных характеристик условий плавания в арктических морях — сплоченность льда. Множество $\{R_0^d\}$ — отмели — сезонным изменениям не подвержено. Навигационные опасности, лед и отмели, описываемые множествами $\{R_0^d\}$ и $\{R_0^h\}$, предлагается учитывать совместно.

Маршруты судна зададим множеством линий $\{G(W, B, V, d)\}$, где W — категория ледового усиления; B — ширина; V — скорость и d — осадка судна.

Вероятность P_0 пересечения маршрутов судна $\{G(W, B, V, d)\}$ хотя бы с одной из опасностей вида $\{R_0^h\}$ или $\{R_0^d\}$ представляет собой меру нежелательного события $G(W, B, V, d) \cap \{R_0^h, R_0^d\} \neq 0$ и определяется по формуле

$$P_0 = P\left[\{G(W, B, V, d)\} \cap \{R_0^h, R_0^d\} \neq 0\right]. \tag{7}$$

Вероятность безопасного плавания P_S определяется условием, при котором ни один из маршрутов $\{G(W, B, V, d)\}$ не пересечет ни одну из опасностей $\{R_0^h\}$ или $\{R_0^d\}$. Это условие устанавливается зависимостью

$$P_S = P\left[\{G(W, B, V, d)\} \cap \{R_0^h, R_0^d\} = 0\right]. \tag{8}$$

События, заданные условиями (7) и (8), составляют полную группу событий, т. е.

$$P_0 + P_S = 1. \quad (9)$$

Формулы (7) и (8) могут использоваться либо для оценки безопасного плавания по рекомендованным путям или каналам, которые характеризуются полосой с заданной шириной и направлением, либо для оценки безопасного плавания во всей заданной акватории. Различие в решении этих задач определяется ограничениями, которые должны быть установлены при выборе множества $\{G(W, B, V, d)\}$. Для рекомендованного пути с заданной шириной полосы движения в множество маршрутов вводятся линии, направление которых соответствует направлению рекомендованного пути. Для всей акватории в множество маршрутов вводятся линии, ориентированные по всем возможным направлениям.

Выводы

1. Предложенный подход к формализации оценки безопасности арктической морской навигации, основанный на методах теории вероятности, позволяет преодолеть основные недостатки, присущие методам экспертных оценок.

2. В работе предложен единый подход для описания ледяных полей и отмелей, представляющих собой два основных вида навигационных опасностей в акватории СМП.

3. Проверку предложенного способа формализации оценки безопасности арктического мореплавания планируется выполнить для реальных участков СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. Утвержден Президентом РФ 18 сентября 2008 года.

2. Федеральный закон от 28 июля 2012 г. № 132-ФЗ. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути.

3. *Дмитриев А. А.* История мореплавания по трассам северного морского пути в XX и начале XXI века: в 3 т. / А. А. Дмитриев, Ю. А. Горбунов, В. Т. Соколов. — СПб.: Морская энциклопедия, 2015. — Т. 3.— 303 с.

4. *Куватов В. И.* Потенциал Северного морского пути арктической зоны России. Факторы и стратегия развития / В. И. Куватов, Д. В. Козьмовский, Н. В. Шаталова // Интернет-журнал Науковедение. — 2014. — № 6 (25). — С. 20.

5. *Смирнов А. А.* Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота России) / А. А. Смирнов, С. А. Головинский // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 108–114.

6. IMO Maritime Safety Committee: ‘Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment’ («Временное Руководство по применению формальной оценки безопасности»), MSC Circular 829. — London, 1997.

7. *Захаров А. А.* Формализованная оценка безопасности — универсальный инструмент для снижения риска на транспорте / А. А. Захаров // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 3 (3). — С. 66–68.

8. *Королев В. Ю.* Математические основы теории риска: Физико-математическая литература / В. Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. — М.: Физматлит, 2007. — 543 с.

9. *Скороходов Д. А.* Принципы и категории обеспечения безопасности мореплавания / Д. А. Скороходов, Л. Ф. Борисова, З. Д. Борисов // Вестник МГТУ. — 2010. — Т. 13. — № 4-1. — С. 719–729.

10. *Емельянов М. Д.* Безопасность морского транспорта России / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 2 (15). — С. 38–43.

11. *Емельянов М. Д.* Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3-4 (22). — С. 40–45.

12. *Мойсеенко С. С.* Безопасность морских грузоперевозок / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер. — Калининград: Изд. БГАРФ, 2011. — 398 с.

13. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

14. *Некрасов С. Н.* Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 98–100.

15. *Решетняк С. В.* Ранжирование трасс Севморпути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3. — С. 55–57.

16. Полярный Кодекс. ИМО. - 2014/2015 – Резолюции MSC/385(94), MEPC.264 (68). Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 232 с.

17. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.

18. *Сантало Л.* Интегральная геометрия и геометрические вероятности / пер. с англ. В. М. Максимова / Л. Сантало. — М.: Наука, 1983. — 358 с.

19. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — НД № 2-020101-72. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013. — 503 с.

20. *Миронов Е. У.* Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях / Е. У. Миронов, И. М. Ашик, В. И. Дымов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 16–28.

FORMALIZATION OF THE ASSESSMENT OF SAFETY OF ROUTES OF THE NORTHERN SEA ROUTE

The article is devoted to a problem of development of the formalized safety assessment of the water area of the Northern Sea Route (NSR) which principles are formulated in documents of the International sea organization. The results of the analysis of the publications devoted to development of the formalized safety assessment on sea transport are given in work. The main shortcomings of the method of expert evaluations used by most of authors of publications when determining probability of an undesirable event and risk of navigation accidents are noted. The alternative method of calculation of the specified parameters based on the theory of geometrical probabilities is offered. As a measure of navigation safety of the water area the author uses probability of crossing of a way of the vessel with navigation danger. The description of the generalized model of the ice-rinks and shallows posing the main threat for navigation on NSR is given. Criteria and interrelation of the main quantitative characteristics of navigation dangers with vessel draft, its width, speed and ice passability are established. The check of formalization of an assessment of safety of the water area of NSR based on the method developed by the author is planned to be executed with use of the materials relating to the operating navigable routes.

Keywords: Northern Sea Route, Formal Safety Assessment, ice field, shoal, danger model, danger measure.

REFERENCES

1. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Utverzhden Prezidentom RF 18 sentjabrja 2008 goda.

2. Federalnyj zakon ot 28 ijulja 2012 g. N 132-FZ. O vnesenii izmenenij v otdelnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federacii v chasti gosudarstvennogo regulirovanija torgovogo moreplavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.

3. Dmitriev, A. A., Ju. A. Gorbunov, and V. T. Sokolov. *Istorija moreplavanija po trassam severnogo morskogo puti v HH i nachale HHI veka: v 3 t.* Vol 3. SPb: Morskaja jenciklopedija, 2015.

4. Kuvatov, Valery Il'ich, Dmitry Vasil'evich Kozmovsky, and Natalya Viktorovna Shatalova. "The potential of the Northern Sea Route in the Arctic zone of Russia. Factors and strategy development." *On-line journal "Naukovedenie"* 6(25) (2014): 20.

5. Smirnov, A. A., and S. A. Golovinsky. "55th Anniversary of the Russian Nuclear Icebreaker Fleet and Development of the Northern Sea Route." *Arktika: jekologija i jekonomika* 4(16) (2014): 108–114.

6. IMO Maritime Safety Committee: 'Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment', MSC Circular 829. London, 1997.

7. Zaharov, A. A. "Formalizovannaja ocenka bezopasnosti — universalnyj instrument dlja snizhenija riska na transporte." *Transport of the Russian Federation* 3(3) (2006): 66–68.

8. Korolev, V. Ju., V. E. Bening, and S. Ja. Shorgin. *Matematicheskie osnovy teorii riska: Fiziko-matematicheskaja literatura*. M.: Fizmatlit, 2007.

9. Skorohodov, D. A., L. F. Borisova, and Z. D. Borisov. "Principy i kategorii obespechenija bezopasnosti moreplavanija." *Vestnik of MSTU* 13.4-1 (2010): 719–729.

10. Emeljanov, M. D. "Bezopasnost morskogo transporta Rossii." *Transport of the Russian Federation* 2(15) (2008): 38–43.

11. Emelyanov, M. D. "Use of conventional risks in estimation of security of seaborne ships." *Transport of the Russian Federation* 3-4(22) (2009): 40–45.

12. Mojseenko, S. S., and L. E. Mejler. *Bezopasnost morskih gruzoperevozok*. Kaliningrad: Izd. BGARF, 2011.

13. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

14. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. "Assessment and prediction of dangerous navigational situations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 2 (2013): 98–100.

15. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of north sea-route on the criterion of hydrographical support." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 55–57.

16. International code for ships operating in polar waters (Polar code). SPb.: AO «CNIIMF», 2016.

17. Gmurman, V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika*. M.: Vysshaja shkola, 2003.

18. Santalo, L. *Integralnaja geometrija i geometricheskie verojatnosti*. Trans. M.: Nauka, 1983.

19. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov. Tom 1. ND №2-020101-72. SPb.: Rossijskij morskoj registr sudohodstva, 2013.

20. Mironov, E. U., I. M. Ashik, V. I. Dymov, M. Ju. Kulakov, and S. V. Kljachkin. "Modeli i metody rascheta i prognoza ledovyh i okeanograficheskih uslovij v arkticheskih morjah." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Виталий Владимирович
Минтранс России
klyuevvv@mintrans.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kljuev Vitaly Vladimirovich
The Ministry of Transport of the Russian Federation
klyuevvv@mintrans.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85
УДК 624.012.4; 626.02

К. П. Моргунов,
М. В. Красникова

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕР ШЛЮЗОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Данные наблюдений и измерений за деформациями стен камер шлюзов Волгоградского гидроузла в последние годы показали изменение параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций. Для оценки напряженно-деформированного состояния стен камер шлюзов были разработаны математические конечно-элементные модели нижних и верхних камер шлюзов с учетом блочного строения и фактического армирования. Выполненные расчеты системы «две камеры, основание и засыпки» для шести

различных режимов функционирования шлюзов (эксплуатационных и ремонтных, в том числе с учетом сезонных температур и температурных перепадов «зима – лето») подтвердили, что ни на шлюзе № 30, ни на шлюзе № 31 нет дефектных узлов или конструктивных недоработок, которые могли бы создать проблемы с точки зрения устойчивости и прочности всей конструкции. Расчетные напряжения и деформации соответствуют фактически наблюдаемым, что свидетельствует о том, что шлюзы находятся в нормальном эксплуатационном состоянии.

Ключевые слова: судоходный шлюз, наполнение и опорожнение камеры шлюза, напряженно-деформированное состояние бетонных конструкций камеры шлюза, физико-механические характеристики грунтов, математическая конечно-элементная модель.

Введение

В состав Волгоградского гидроузла входят: два параллельных двухкамерных шлюза (шлюзы № 30 и № 31 Волжского каскада) с причальными стенками и входными палами, межшлюзовая ГЭС специального назначения с подводящим и отводящим лотками и водосбросом, ограждающая дамба с маяком, левобережный пирс с маяком, нижний подходной канал с маяком. Верхние камеры шлюзов размещаются в верхнем бьефе, средние головы входят в состав сооружений напорного фронта гидроузла. Параллельные нитки шлюзов № 30 и № 31 имеют одинаковую конструкцию. Полезные размеры камер шлюзов 290,0 × 30,0 м, минимальная судоходная глубина на порогах голов и камер — 4,0 м. При подпорном горизонте верхнего бьефа и низшем горизонте нижнего бьефа падение напора на шлюзе разбивается между камерами пополам с общим максимальным напором на средней голове 27,5 м.

Судоходные шлюзы Волгоградского гидроузла являются гидротехническими сооружениями I класса и находятся в эксплуатации уже более 55 лет. Длительная эксплуатация шлюзов привела к определенным изменениям параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций, особенно проявившимся в последние годы. Это может быть обусловлено тем, что в эти годы изменился характер эксплуатации шлюзов — существенно снизилось количество шлюзований, зачастую одна из ниток гидроузла выводилась из эксплуатации для производства ремонтных работ, подвергаясь при этом температурным воздействиям значительных амплитуд. Приборы, имеющиеся на сооружениях гидроузла, в том числе закладные приборы, установленные в момент строительства, зафиксировали изменения в деформациях верха стен камер шлюзов, а также в напряжениях в тыловой арматуре стены. И хотя имеющаяся на гидроузле контрольно-измерительная аппаратура, в том числе и закладная, с момента ввода её в эксплуатацию морально и физически устарела, многие из закладных приборов вышли из строя, такие изменения вызвали озабоченность служб эксплуатации гидроузла. Поэтому в 2014 – 2015 гг. были проведены работы по исследованию и расчетам прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходных шлюзов № 30 и № 31 Волгоградского гидроузла.

Исходной информацией для таких расчетов являются:

– конструкция и геометрические размеры камер шлюзов;

– схема армирования, характеристики бетона и арматуры железобетонных конструкций камер;

– характеристики грунтов основания камер и обратных засыпок за стенами расчетных секций камер.

Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния элементов верхней и нижней камер шлюзов

Исходные данные для расчетов

В соответствии с проектной и строительной документацией [1], а также паспортом и эксплуатационной документацией гидроузла были приняты следующие конструкции верхней и нижней камер шлюзов (поперечные разрезы представлены на рис. 1 и 2).

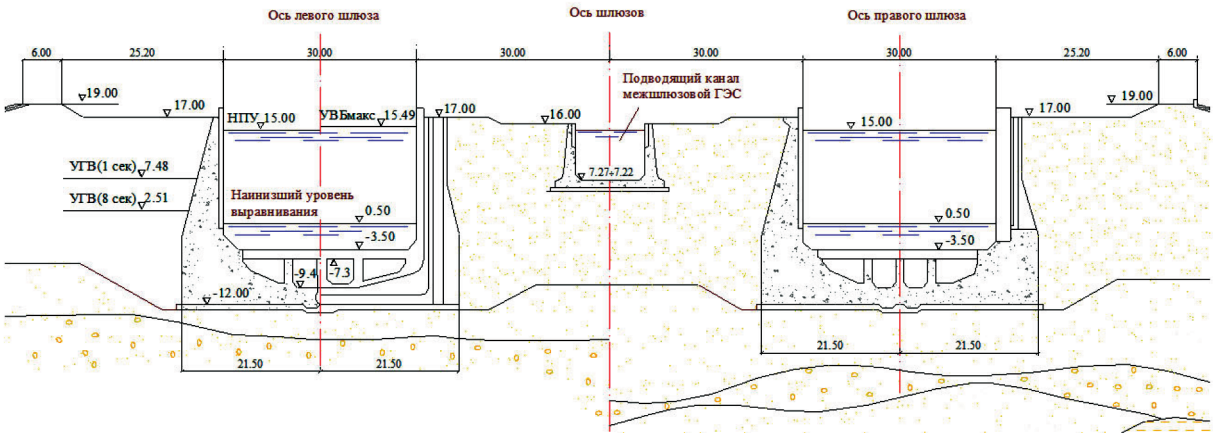


Рис. 1. Верхние камеры шлюзов, поперечный разрез

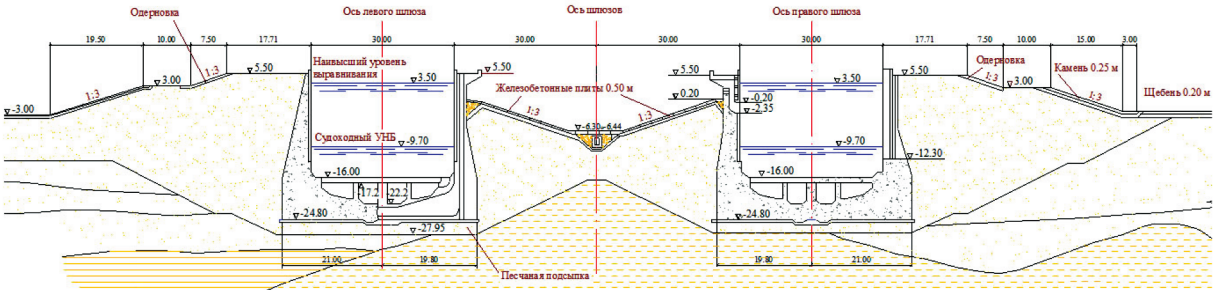


Рис. 2. Нижние камеры шлюзов, поперечный разрез

Стены камер шлюзов разделены на девять секций:

– верхние камеры включают семь секций по 31,0 м и две секции в примыканиях к верхней и нижней головам, соответственно, 21,0 и 29,0 м;

– нижние камеры включают семь секций по 31,0 м и две секции, примыкающие к головам, по 21,0 м каждая.

Секции камер отделены друг от друга и от голов температурно-осадочными швами, швы перекрыты противофильтрационными шпонками. Тыловые грани стен имеют наклон 4 : 1, лицевая грань — 100 : 1.

Камеры шлюзов — железобетонные, с временно разрезным днищем на период строительства и с фермами-затяжками для предварительного обжатия бетона днища, докового типа. Стены камер высотой 21,5 м в нижних камерах и 20,5 м в верхних камерах армированы фермами, на тыловой грани в промежутках между фермами установлены армопакеты. В качестве рабочей арматуры использованы арматурные стержни из горячекатаной стали периодического профиля СТ-5, с Rs и Rsc 350 МПа. Шаг арматуры у лицевой грани стен — 60 см, у тыловой грани стен — 30 см. По высоте стены камер шлюзов разделены горизонтальными межблочными строительными швами, которые выполнены на отметках 0,00 м; +9,5 м; +14,3 м в верхних камерах и на отметках –12,3 м; –4,3 м; +2,9 м — в нижних камерах.

Нижние межблочные швы (на отметке 0,00 в стенах верхней камеры и на отметке 12,3 м в стенах нижней камеры) пересекаются арматурой диаметром 60 мм, установленной с шагом 200 мм у тыловых граней стен (площадь сечения составляет 141,3 см^2 на один погонный метр протяженности стен).

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) были выполнены для средних секций (секции № 5), верхней и нижней камер шлюзов.

Физико-механические характеристики грунтов основания расчетных секций камер шлюзов были приняты следующими:

– модуль деформации E = 50 МПа;

– коэффициент Пуассона ν = 0,3;

– объемный вес во взвешенном состоянии γ = 20 кН/м^3;

– угол внутреннего трения φ = 30º;

– сцепление C = 0.

Для грунтов засыпки пазух за стенами расчетных секций приняты следующие характеристики.

Для верхней камеры

– грунт нижней боковой засыпки:

модуль деформации E = 50 МПа;
коэффициент Пуассона ν = 0,35;
объемный вес в естественном состоянии γ = 18 кН/м^3;
объемный вес во взвешенном состоянии γ = 11 кН/м^3;
угол внутреннего трения φ = 30º;
сцепление C = 0;

– грунт верхней боковой засыпки:

модуль деформации E = 75 МПа;
коэффициент Пуассона ν = 0,35;
объемный вес в естественном состоянии γ = 18 кН/м^3;
объемный вес во взвешенном состоянии γ = 11 кН/м^3;
угол внутреннего трения φ = 30º;
сцепление C = 0.

Для нижней камеры

– грунт боковой засыпки:

модуль деформации E = 50 МПа;
коэффициент Пуассона ν = 0,35;
объемный вес в естественном состоянии γ = 18 кН/м^3;
объемный вес во взвешенном состоянии γ = 11 кН/м^3;
угол внутреннего трения φ = 30º;
сцепление C = 0.

Для оценки достоверности результатов в процессе численных расчетов НДС проводилось их сопоставление с данными натурных наблюдений и измерений, полученных от эксплуатационных служб гидроузла [2]. В том числе принимались измеренные взаимные горизонтальные перемещения верха стен (секции № 5) камер шлюза в диапазоне от 1,8 мм до 2,5 мм при наполнении-опорожнении камеры (в пределах отметок от 0,5 м до 15 м — в верхней камере; от –9,7 м до +3,5 м — в нижней камере).

Сезонные амплитуды взаимных перемещений верха стен (секции № 5) камер шлюза для сопоставления с расчетами принимались в диапазоне от 20 мм до 29 мм при сезонном перепаде температуры (между зимней температурой и летней температурой).

Значения растягивающих напряжений в арматуре у тыловой грани стен камер шлюзов принимались по данным закладных приборов, установленных в арматуре свыше 55 лет назад. И хотя показания этих приборов вызывают сомнение, они были приняты для качественной оценки достоверности расчетов. Принято, что максимальные измеренные значения растягивающих напряжений в арматуре у тыловой грани стен камер шлюзов составили 180 – 200 МПа в летний период, когда к напряжениям, возникающим от действия давления грунта засыпки и грунтовых вод на тыловую грань стен, добавляются напряжения от действия температуры. При этом лицевая грань стены разогрета и стремится удлиниться, но остальная часть стены препятствует этому. В результате лицевая грань испытывает дополнительное сжатие, а тыловая грань — дополнительное растяжение.

Математическая расчетная модель «камера — основание — засыпка»

Расчетные схемы

При расчётах НДС типовой секции камер шлюзов (секции № 5) рассматривались следующие расчетные случаи.

1. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза), при этом уровень воды в камере соответствует уровню нижнего бьефа.

В этом случае при расчетах необходимо учитывать следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес воды в камерах;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– давление воды в камерах при наинизшем уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном уровне нижнего бьефа (УНБ), равном –9,7 м (для нижней камеры);

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при уровне грунтовых вод (УГВ) = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания.

2. Эксплуатационный случай в период навигации при наполнении (камеры левого шлюза) — уровень воды в камере соответствует уровню верхнего бьефа.

Включает в себя следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес воды в камерах;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– давление воды в камерах при НПУ = 15,0 м (для верхней камеры) и наивысшем уровне выравнивания, равном 3,5 м (для нижней камеры);

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания.

3. Ремонтный случай (для камер правого шлюза) — камера полностью опорожнена.

Включает в себя следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания.

4. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза) с учетом температурного перепада «зима – лето».

Включает в себя следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес воды в камерах;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– давление воды в камерах: при наинизшем уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном УНБ = –9,7 м (для нижней камеры);

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания;

– воздействие температурного перепада «зима – лето», равного + 58 °С (от температуры воздуха –27 °С — наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 до температуры воздуха +31 °С — летней температуры обеспеченностью 0,98 [3]).

5. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза) с учетом летней температуры.

Включает в себя следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес воды в камерах;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– давление воды в камерах: при наинизшем уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном УНБ = –9,7 м (для нижней камеры);

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания;

– температурное воздействие летнего периода +31 °С (летняя температура воздуха обеспеченностью 0,98 [3]).

6. Эксплуатационный случай в зимний период.

Включает в себя следующие нагрузки:

– собственный вес сооружений;

– вес грунта засыпки в естественном состоянии;

– вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;

– активное давление грунта со стороны засыпки;

– давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания;

– температурное воздействие зимнего периода –27 °С (температура воздуха наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 [3]).

Расчетные схемы для верхней и нижней камер шлюзов представлены на рис. 3 и 4.

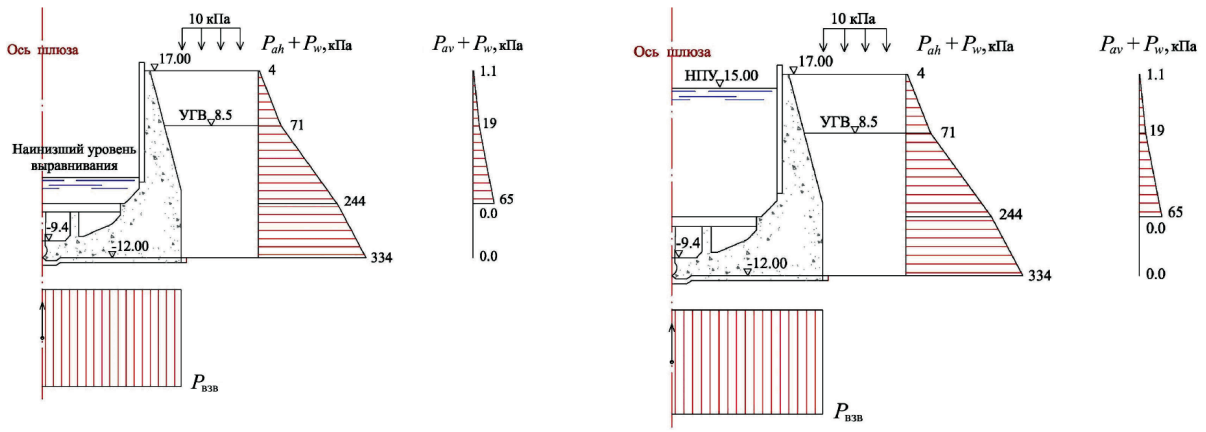
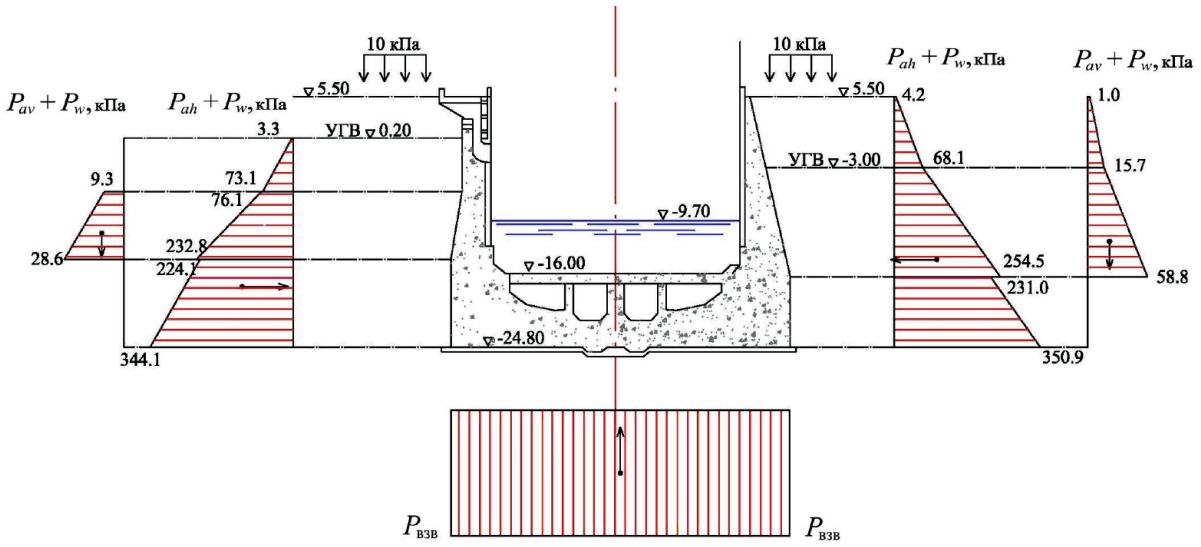


Рис. 3. Расчетные схемы для верхней камеры шлюзов

а)



б)

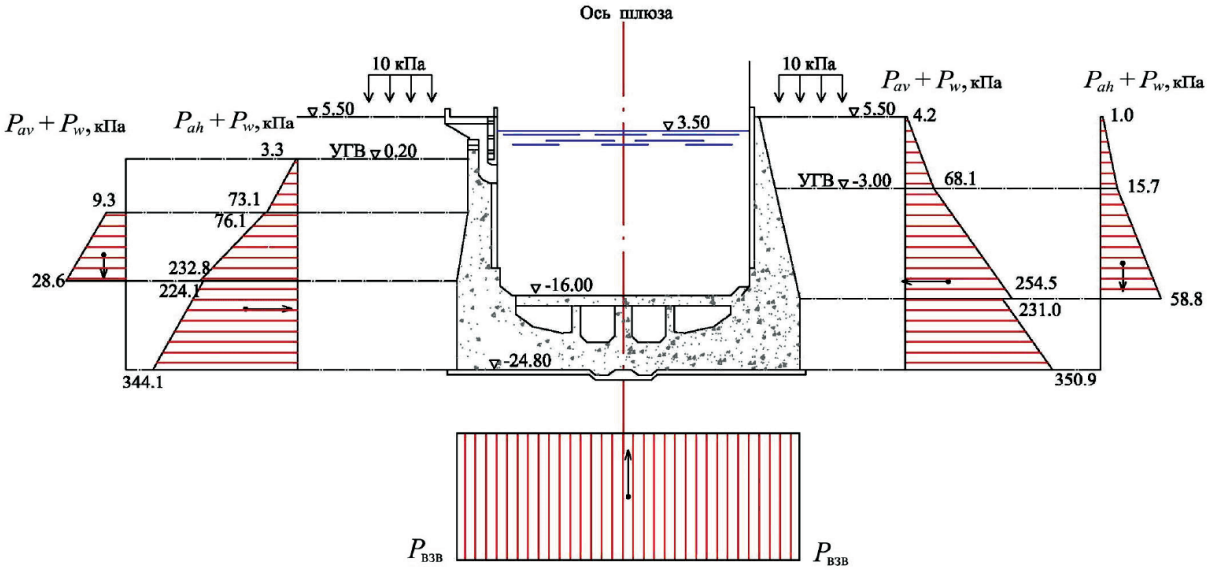


Рис. 4. Расчетные схемы для нижней камеры шлюзов:
а — при опорожненной камере; *б* — при наполненной камере

Методика моделирования железобетонных конструкций камер шлюзов совместно с основанием

Для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций стен шлюзов используются различные методы и математические модели [4] – [8], в том числе и позволяющие учесть влияние температурного режима [9], [10]. Для расчетов камер шлюзов Волгоградского гидроузла в настоящей работе были разработаны математические конечно-элементные модели нижних и верхних камер шлюзов с учетом блочного строения и фактического армирования в рамках методики численного моделирования массивных железобетонных гидросооружений. При этом в конечно-элементных моделях воспроизводились конструктивные особенности камер шлюзов (в том числе такие как расположение контактных строительных швов, ослабляющих конструкцию; схемы армирования элементов конструкций и др.); особенности характера действия нагрузок (включая давление воды и грунта в основании и в засыпке стен, противодавление в рас-

крывшихся блочных швах и др.); физико-механические характеристики материалов сооружения, грунтов основания и засыпки стен и др.

Расчеты проводились итерационным путем. На каждом последующем этапе расчетов конечно-элементные модели корректировались с учетом полученных на предыдущих этапах результатов.

Взаимодействие с грунтом основания учитывалось включением в расчетную схему достаточно большого объема грунта. Расчетная толща массива основания принималась в модели таким образом, чтобы на нижней грани выделенного фрагмента основания величина сжимающих напряжений не превышала 20 % от величины бытовых напряжений. Основание моделировалось послойно с учётом геологического строения, принятого для расчётной области.

Нагрузки, передаваемые на тыловые грани стен от давления грунта засыпки, от фильтрационного давления воды в засыпке, а также от давления воды на лицевые грани стен, моделировались в соответствии с расчетными схемами, приведенными на рис. 3 и 4. Нагрузки от давления грунта засыпки на тыловые грани стен камер шлюзов моделировались силами, приложенными в узлах аппроксимирующей сетки, нагрузки от воды — давлением на соответствующие конечные элементы.

Пример конечно-элементных моделей нижних камер шлюзов представлен на рис. 5, пример цветовых полей распределения температур в конструкциях нижних камер шлюзов — на рис. 6.

а) б)

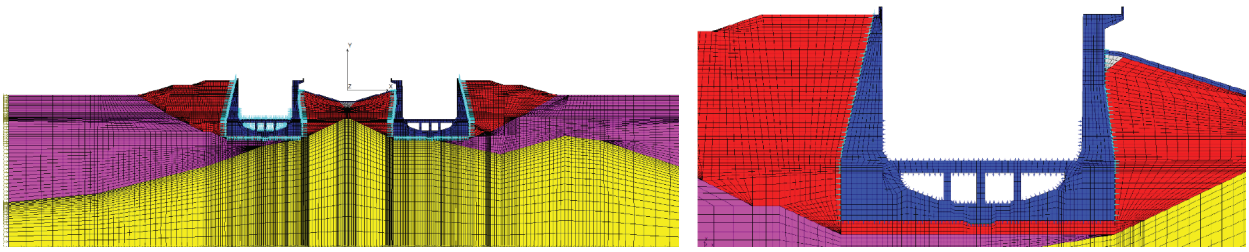


Рис. 5. Общий вид конечно-элементной модели нижних камер шлюзов (*а*);
Фрагмент конечно-элементной модели нижней камеры шлюза (*б*)

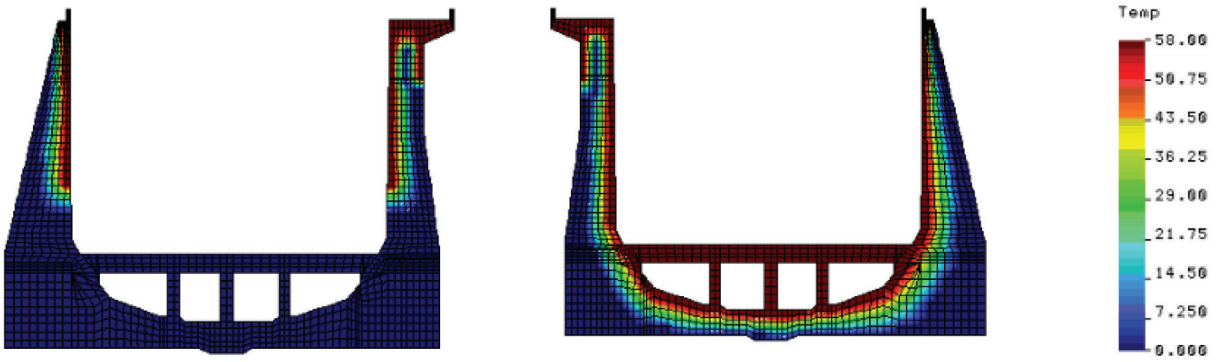


Рис. 6. Цветовые поля распределения температурного перепада «зима – лето»
в конструкциях нижних камер шлюзов

Анализ результатов расчета и сопоставление их с данными натурных наблюдений

С использованием разработанной методики были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций камер шлюзов для всех шести упомянутых выше расчетных случаев. Примеры результатов расчета шлюза № 31 в виде цветовых полей распределения максимальных главных напряжений, вертикальных и горизонтальных перемещений, а также картина деформированного состояния конструкций камер шлюзов приведены на рис. 7 – 11.

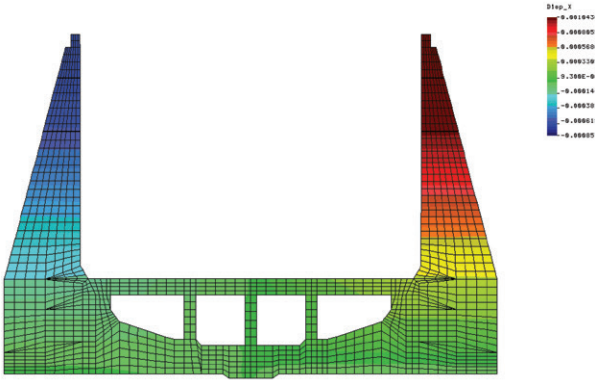


Рис. 7. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях верхней камеры шлюза № 31 в эксплуатационном случае в период навигации при наполненной камере шлюза

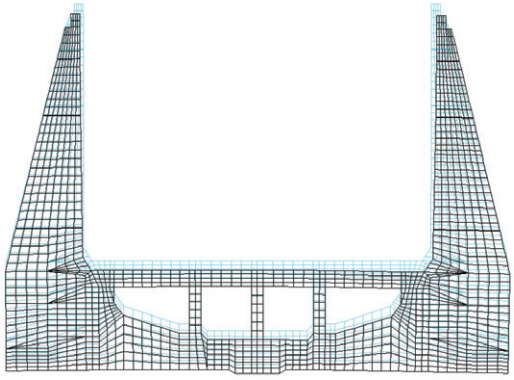


Рис. 8. Деформированное состояние конструкции верхней камеры шлюза № 31 в эксплуатационном случае в период навигации при наполнении камеры (наполненная и осушенная камеры)

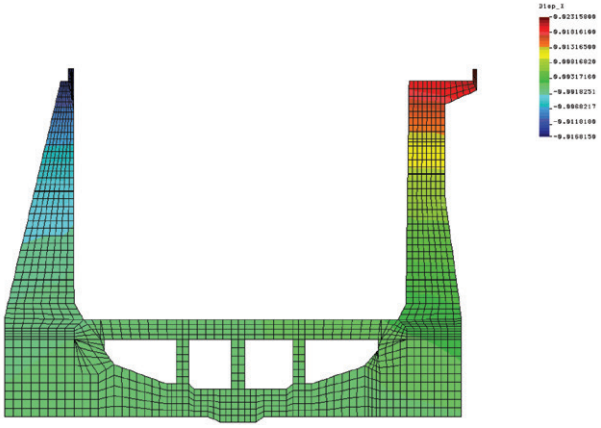


Рис. 9. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях нижней камеры шлюза № 31: ремонтный случай, камера осушена, летняя температура +40 °С, в засыпке +10 °С, без учета отпора грунта засыпки (развал 39,9 мм)

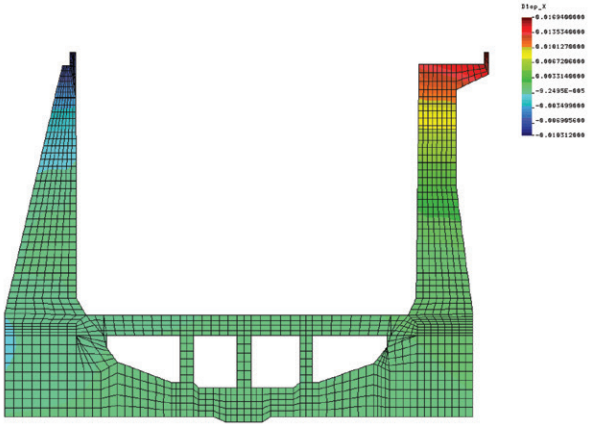


Рис. 10. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях нижней камеры шлюза № 31: ремонтный случай, камера осушена, летняя температура + 40 °С, в засыпке + 10 °С, с учетом отпора грунта засыпки (развал 27,2 мм)

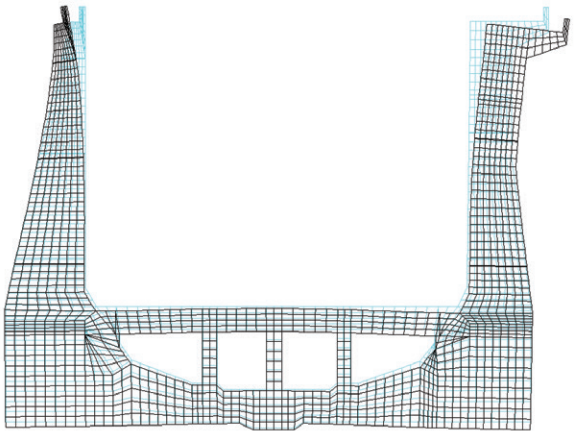


Рис. 11. Деформированное состояние конструкции нижней камеры шлюза в эксплуатационном случае в период навигации при опорожнении камеры с учетом температурного перепада «зима – лето»

Анализ результатов расчетов для эксплуатационного случая в период навигации при опорожнении камер с учетом температурного перепада «зима – лето» показал следующее:

– развал стен верхней камеры (амплитуда сезонных перемещений) в летний период относительно зимнего периода составил 26,9 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 20 мм до 27 мм);

– развал стен нижней камеры (амплитуда сезонных перемещений) в летний период относительно зимнего периода составил 28,8 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 22 мм до 29 мм).

Из анализа результатов выполненных расчетов в эксплуатационном случае в период навигации при наполнении и опорожнении камер шлюзов можно заключить:

развал стен верхней камеры при наполнении-опорожнении составил 2,1 мм, развал стен нижней камеры при наполнении-опорожнении составил 2,5 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 1,8 мм до 2,5 мм).

В эксплуатационном случае в период навигации при опорожнении с учетом летней температуры получилось следующее:

– максимальные значения растягивающих напряжений в конструкциях камер шлюзов отмечаются на тыловой грани стенок в зоне нижнего межблочного шва (до 2,235 МПа в стенке верхней камеры и до 2,37 МПа в стенке нижней камеры); по результатам расчетов в продольной вертикальной арматуре, пересекающей данные швы, напряжения достигают 164 МПа в стене верхней камеры и 178 МПа в стене нижней камеры, что согласуется с данными натурных наблюдений (до 180 – 200 МПа).

Расчеты в ремонтном случае при осушенной камере с учетом летней температуры дали следующие результаты:

– верхняя камера: летняя температура + 40 °С, в засыпке + 10 °С — без учета отпора грунта засыпки развал — 30,6 мм; с учетом отпора грунта засыпки развал — 19,7 мм;

– нижняя камера: летняя температура + 40 °С, в засыпке + 10 °С — без учета отпора грунта засыпки развал – 39,9 мм; с учетом отпора грунта засыпки развал — 27,2 мм.

Заключение

В процессе создания и отладки математической модели были выполнены расчеты различных случаев функционирования гидроузла, сопоставление результатов которых проводилось с данными натурных наблюдений.

Расчеты напряженно-деформированного состояния системы «две камеры, основание и засыпки» показали, что ни на шлюзе № 30, ни на шлюзе № 31 нет дефектных узлов или конструктивных недоработок, которые могли бы создать проблемы с точки зрения устойчивости и прочности всей конструкции. Реализованные по проекту камеры относятся к классическому типу сооружения и гораздо более надежны, нежели разрезные камеры шлюза.

Выполненные расчеты подтвердили, что расчетные напряжения и деформации соответствуют фактически наблюдаемым. Это свидетельствует о том, что эксплуатируемые шлюзы находятся в нормальном эксплуатационном состоянии и наблюдаемый некоторый рост напряжения и перемещений верха стен не является опасным. Тем не менее, эти обстоятельства требуют более тщательного контроля.

Кроме того, следует отметить, что при расчетах в качестве исходных данных использовались характеристики грунтов, взятые из проектных материалов. Определение реальных характеристик грунтов основания и засыпок после многих лет функционирования сооружений представляет собой отдельную достаточно сложную задачу. Не удалось также смоделировать точные прочностные и деформационные характеристики элементов камеры из-за наличия строительных швов и длительных изменений в свойствах использованных материалов. Поэтому говорить о точности и адекватности результатов, полученных с использованием разработанной математической модели, можно лишь условно, так как понятно, что соответствие результатов расчета натурным процессам определяется точностью исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС. Технический отчет о проектировании и строительстве: в 2 т. — М.: Энергия, 1965. — Т. I. — 650 с.

2. Декларация безопасности Волгоградского гидроузла в составе: шлюза № 30, шлюза № 31, Межшлюзовой ГЭС с подводящими и отводящими лотками и водосбросом № 36 ФБУ «Волго-Дон». — Волгоград, 2012.

3. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. — М.: Минрегион России, 2012. — 109 с.

4. *Зенкевич О.* Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. — М.: Мир, 1986. — 318 с.

5. *Гольдин А. Л.* Расчет осадок и кренов центральной секции шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала / А. Л. Гольдин, М. А. Колосов, К. П. Моргунов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 3. — С. 15–21.

6. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния камеры судоходного шлюза с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков, В. А. Данилюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 4. — С. 16а–21.

7. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 8–14.

8. *Левачев С. Н.* Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы / С. Н. Левачев, Т. С. Федорова // Вестник МГСУ. — 2013. — № 8. — С. 137–149.

9. *Семенов А. А.* Влияние отрицательных температур на напряженно-деформированное состояние стен камер судоходных шлюзов: дис. … канд. техн. наук / Семенов А. А. — СПб.: СПГУВК, 2005.

10. *Моргунов К. П.* Оценка технического состояния камеры шлюза по тепловому состоянию его элементов / К. П. Моргунов, А. А. Кардаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 22а–28.

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE ELEMENTS LOCK CHAMBER VOLGOGRAD HYDROELECTRIC COMPLEX UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

These observations and measurements of the deformations of the walls of the Volgograd hydroelectric camera gateways in recent years have shown a change of parameters that characterize the state of the buildings and structures. To evaluate the stress-strain state of the walls gateways cameras mathematical finite element models were developed by the lower and upper chambers of gateways based on the block structure and the actual reinforcement. The calculations of the system, «the two chambers, the base and backfill» for six different gateway modes of operation (maintenance and repair, including taking into account the seasonal temperatures and temperature extremes «winter – summer») confirmed that no gateway number 30 or the gateway number 31 is not defective components or structural defects that could create problems in terms of stability and strength of the whole structure. Calculated stresses and strains correspond actually observed, which indicates that the locks are in good operating condition.

Keywords: ship lock, filling and emptying of the lock chamber, stress-strain state of concrete structures lock chamber, physico-mechanical properties of soils, a mathematical finite element model.

REFERENCES

1. Volzhskaja GJeS im. XXII sezda KPSS. Tehnicheskij otchet o proektirovanii i stroi-telstve. M., 1965. Vol. I.

2. Deklaracija bezopasnosti Volgogradskogo gidrouzla v sostave: shljuza № 30, shljuza № 31, Mezhshljuzovoj GJeS s podvodjashhimi i otvodjashhimi lotkami i vodosbrosom № 36 FBU «Volgo-Don». Volgograd, 2012.

3. Russian Federation. Set of rules. SP 131.13330.2012 Stroitelnaja klimatologija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 23-01-99*. M.: Minregion Rossii, 2012.

4. Zenkevich, O., and K. Morgan. *Konechnye jelementy i approksimacija*. Trans. M., 1986.

5. Goldin, A. L., M. A. Kolosov, and K. P. Morgunov. "Calculation for settlement and slant of central part of hydraulic lock № 5 of Volga-Don inland navigation channel." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommu-nikacij* 3 (2009): 15–21.

6. Goloskokov, D. P., and V. A. Daniljuk. "Modelling of the intense-deformed condition of the navigable sluice chamber by means of polynoms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4 (2011): 16–21.

7. Goloskokov, D. P. "Simulation of stress-strain state of elastic bodies with polynomials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2013): 8–14.

8. Levachev, Stanislav Nikolaevich, and Tat'yana Sergeevna Fedorova. "Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel." *Vestnik MGSU* 8 (2013): 137–149.

9. Semenov, A. A. Vlijanie otricatelnyh temperatur na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie sten kamer sudohodnyh shljuzov. PhD diss. SPb.: SPGUVK, 2005.

10. Morgunov, K. P., and A. A. Kardakov. "The assessment of the technical condition of the sluice by thermo condition of its elements." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 22–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Моргунов Константин Петрович — кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
morgunovkp@gumrf.ru
Красникова Марина Валерьевна — аспирант.
Научный руководитель:
Моргунов Константин Петрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
mvkrasnikova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Morgunov Konstantin Petrovich — PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
morgunovkp@gumrf.ru
Krasnikova Marina Valerievna — postgraduate.
Supervisor:
Morgunov Konstantin Petrovich.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
mvkrasnikova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-85-94
УДК 627.8

М. А. Колосов,
Н. В. Селезнёва

ЗАЩИТА ОТ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ ПОСРЕДСТВОМ УСТРОЙСТВА РУСЛОВЫХ ПОРОГОВ

В статье рассмотрены актуальные для горных районов средства борьбы с дождевыми паводками. Приведен обзор западного опыта по расчисткам русел рек и эффективности малых водохранилищ, задерживающих паводковый сток. Проанализировано действие расчистки русла и приведено обоснование недостаточности русловых расчисток для увеличения пропускной способности водотока. Рассчитаны необходимые размеры поперечного сечения водопропускного канала, требуемые для обеспечения пропуска паводкового расхода воды в р. Адагум. Рекомендуется противопаводковая система защиты бассейна р. Адагум с помощью временных водохранилищ-«ловушек», задерживающих дождевой сток в русле реки, образованных порогами. Приведены конструкции порогов с учетом пропуска меженного стока воды и рыбопропуска. Предложены конструктивные схемы порогов из разных материалов. Представлены конструкции порогов с различными формами водосливов. Изложены расчетные формулы для определения необходимого количества порогов, сооружаемых в русле реки и среднего объема воды, задерживаемого в водохранилище, образованном одним порогом. Сделан вывод о надежности противопаводковой системы, состоящей из «сухих» водохранилищ, распределяющих по времени сток паводковых объемов воды к населенному пункту.

Ключевые слова: дождевые паводки, регулирование, противопаводковые водохранилища, временно заполняемые водохранилища, пороги, плотины, «сухие» водохранилища.

Введение

Основная задача борьбы с речными наводнениями состоит в создании в речном бассейне условий, благоприятствующих выравниванию процессов стекания воды по руслу реки. Это выравнивание достигается проведением комплекса мероприятий в начальных звеньях гидрографической сети и регулированием стока с помощью водохранилищ. Регулирование паводков распределительной системой водохранилищ с учетом экологических факторов было изложено в работе Л. Ю. Макаровой [1], в которой автором были рассмотрены три схемы регулирования паводковых расходов:

1) с помощью создания крупных противопаводковых водохранилищ, характеризующихся затоплением больших площадей в верхнем бьефе и негативными экологическими последствиями и как следствие, большими ущербами;

2) с помощью русловых гидроузлов с ГЭС;

3) с помощью комбинированной схемы совместного регулирования паводковых расходов русловым гидроузлом с ГЭС и временно-заполняемыми водохранилищами. Введено понятие *регулирование стока распределенной системой водохранилищ* и проанализировано воздействие временно заполняемых водохранилищ на экосистему водосбора.

В статье [2] была предложена система небольших водохранилищ-«ловушек», располагаемых на мелких притоках, в лесных ручьях и оврагах с постепенным спуском дозированного расхода через водосбросы, рассчитанные на пропуск безопасного расхода, и предложены фильтрующие конструкции плотин.

Система защиты от наводнений заявлена В. С. Новиковым в патенте на полезную модель 2004 г. в виде комплекса временных противопаводковых водохранилищ, устанавливаемых на притоках реки. Пропуск воды дозируется посредством сквозного отверстия, рассчитанного на пропуск безопасного расхода, при этом водосбросные отверстия плотин, расположенных на одном притоке, имеют одинаковую площадь поперечного сечения. Предложенная В. С. Новиковым полезная модель предполагает возведение большого количества каскадов водохранилищ, накапливающих воду в бассейне водосбора между соседними плотинами [3].

С. В. Боровков предлагает применять строительство фильтрующих плотин для защиты от наводнений путем срезки пика паводка и перераспределения стока во времени, а также перекрытия второстепенной протоки в многорукавном русле [4]. Также им был проанализирован фильтрационный режим в габионных сооружениях [4].

Основная часть

Для защиты от подтопления городов и поселков, расположенных на Черноморском побережье (г. Сочи, Туапсе, Новороссийск), а также на северном склоне Кавказа (г. Крымск, Майкоп, Кисловодск и др.) в Краснодарском крае Постановлением губернатора от 01 августа 2012 г. № 881 утверждена долгосрочная целевая программа «Развитие водохозяйственного комплекса Краснодарского края в 2013 – 2020 гг.», реализация которой может предусматривать строительство дамб обвалования, «сухих» водохранилищ, обводных каналов, а также проведение других защитных мероприятий. Наряду с мероприятиями по защите населения от паводков предусмотрены также мероприятия по расчистке русел рек для увеличения их пропускной способности.

Предполагается, что расчистка русла увеличит пропускную способность и понизит уровень подтопления территорий, однако из справочных гидравлических таблиц коэффициентов шероховатости для различных водотоков видно, что в результате расчистки и бетонирования водопропускного канала вместе с увеличением пропускной способности уменьшится коэффициент шероховатости русла, а, следовательно, увеличится коэффициент Шези и скорость стекания паводковых вод в населенный пункт. Из опыта расчистки русел р. Рейна, Везера, Одера (Европа) [5], Миссисипи и Миссури (США) в XIX – XX вв. известно, что, несмотря на комплекс дноуглубительных и выправительных работ, опасность наводнений на этих ре-

ках сохранялась в течение всех последующих лет [6], [7]. Так, на р. Рейн (Германия) наводнение удалось уменьшить только в последние годы, когда в его верховьях были построены водохранилища-«ловушки», задерживающие паводковый сток. На Рейне эти водохранилища образованы бетонными плотинами с щелевыми водосбросами и носят постоянный характер [8]. После паводка 2000 г. власти Германии потребовали расчистить русло р. Одер, предложив убрать оттуда полузапруды, построенные для укрепления берегов и русла ещё в начале прошлого века с целью увеличения судоходных глубин, однако исследования показали, что их влияние на паводковый уровень незначительно [9]. Ученые института Водного строительства (г. Карлсруэ) провели моделирование участков р. Одер на физической модели длиной около 100 м. Результаты были следующими: разборка полузапруд из русла понизит паводковый уровень на 5 см [10], [11].

Общеизвестно, что пропускная способность реки зависит от двух основных параметров: площади живого сечения реки и скорости течения, при этом расчистка русла позволит увеличить площадь сечения, углубляя русло и срезая берега, а скорость течения можно увеличить только за счет увеличения уклона, а увеличить уклон свободной поверхности воды практически невозможно [12]. Это заключение было изложено В. И. Истоминым [13] и подтверждено расчетами авторов [14] применительно к г. Крымску (р. Адагум) [15]. Направление паводковых потоков на г. Крымск (июль 2012 г.) [16] показано на рис. 1. Максимальный прошедший паводковый расход 1500 м^3/с был принят по результатам анализа, выполненного Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) после прохождения паводка [15]. При уклоне I = 0,0051 и скорости потока V = 2,35 м/с для пропуска данного расхода потребуется площадь поперечного сечения канала 638,3 м^2. При глубине канала 2,0 м его ширина составит 320 м. Учитывая, что канал необходимо проложить через весь город, объем выемки грунта при длине канала порядка 11 км составит более 6,5 млн м^3 [14].

Сопоставление площадей поперечных сечений паводкового потока 6 – 7 июля 2012 г. и меженного русла приведено на рис. 2 [15]. Из рисунка видно, что при выходе на пойму при максимальном паводковом расходе в р. Адагум площадь поперечного сечения во время паводка июля 2012 г. превысила площадь меженного русла в 112 раз. Общий вид затопленного города приведен на рис. 3 [16].



Рис. 1. Направление паводковых потоков на г. Крымск (июль 2012 г.)

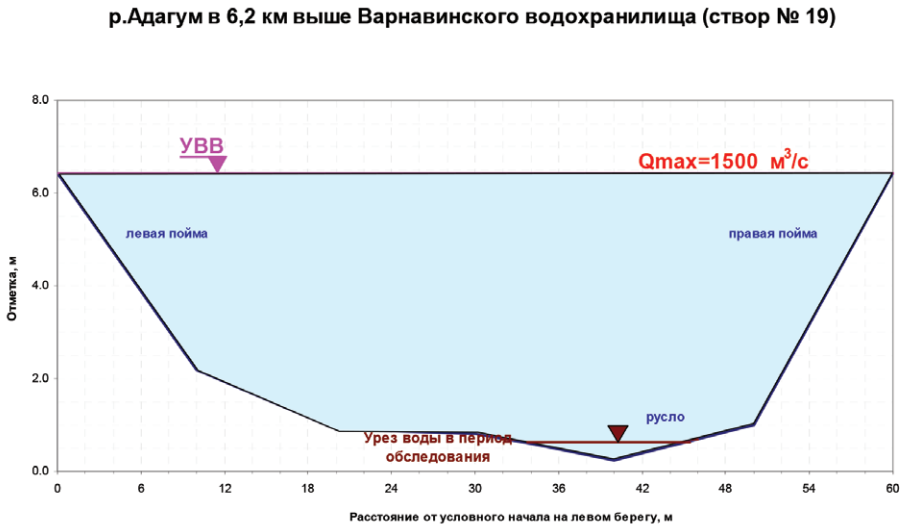


Рис. 2. Заполнение поперечного сечения русла р. Адагум паводковыми водами 6 – 7 июля 2012 г.: *УВВ* — уровень высоких вод (наивысший уровень воды, определенный по меткам высоких вод); Q_{max} — максимальный расход воды, рассчитанный гидравлическим методом на основе данных полевых гидрографических обследований



Рис. 3. Общий вид затопленного города Крымск в июле 2012 г.

Учитывая, что расчистка русла не решает вопроса снижения паводка в населенных пунктах, расположенных в предгорьях, предлагается вернуться к схеме задержки паводковых вод в зоне их формирования. Схема расположения противопаводковых плотин на притоках рек достаточно разработана [17] и особенно эффективна на притоках р. Адагум, где имеются террасы, позволяющие задержать 66 % объема стока [14]. На реках, имеющих достаточно крутые продольные уклоны и каньонное сечение русла, вместо плотин формируются каменные пороги, при этом каждый из них в период паводка должен создавать временное водохранилище (рис. 4).

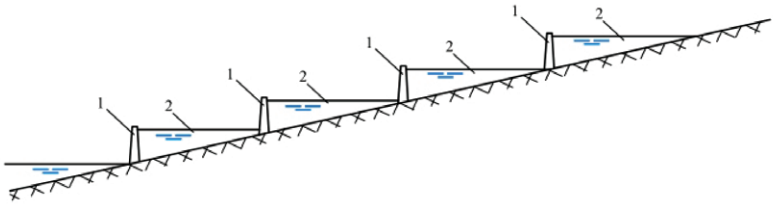


Рис. 4. Схема разбивки русла на пороги: *1* — пороги; *2* — временные водохранилища

Конструкция порогов должна выполнять две задачи:

– в период паводка задерживать паводковый объем воды;

– в межпаводковый период пропускать меженный сток воды, а в нерестовых реках — выполнять рыбопропускную функцию.

Конструкция таких порогов создается самой природой на реках Карелии. Здесь каждый порог создает подпорный участок реки с достаточно большой площадью, при этом большинство рек Карелии, благодаря естественным порогам, имеют безопасный паводковый режим.

Конструкция естественных каменных порогов имеет следующие формы водосливов (рис. 5):

– поверхностный ступенчатый водослив (рис. 5, *а*);

– щелевой поверхностный водослив (рис. 5, *б*);

– глубинный фильтрующий порог (рис. 5, *в*);

– водопадный порог (рис. 5, *г*).

Каждый каменный порог сбрасывает накопленный объем за счет фильтрации через каменную наброску.

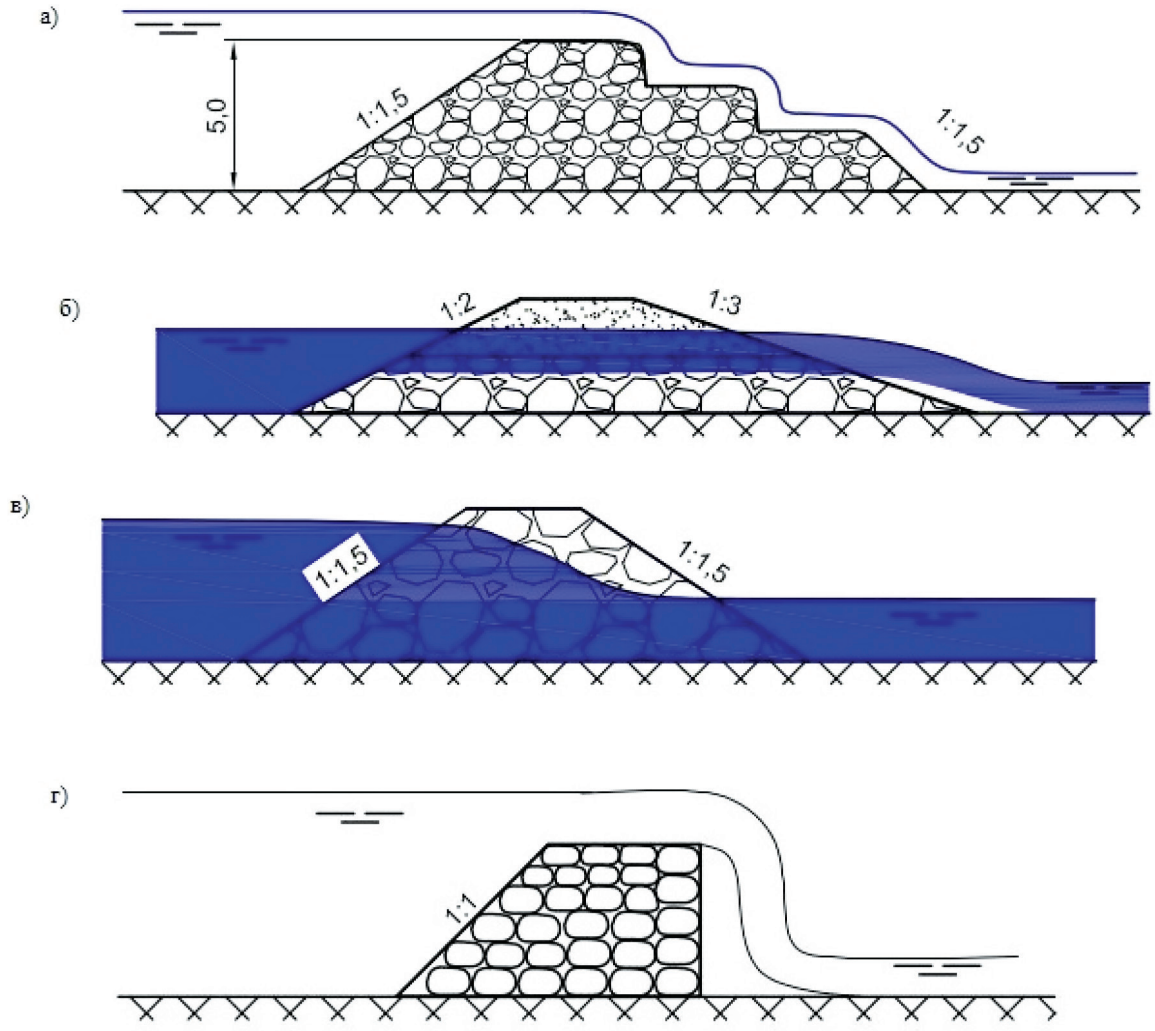


Рис. 5. Формы водосливов естественных каменных порогов:
а — порог со ступенчатым водосливом; *б* — порог со щелевым водосливом;
в — порог с фильтрующим водосливом; *г* — водопадный порог

Пороги в руслах рек можно построить не только из камня, но также из мешков с песком [18], [19] или геотуб (рис. 6, *а*), грунта и хвороста (фашин) — рис. 6, *б*.

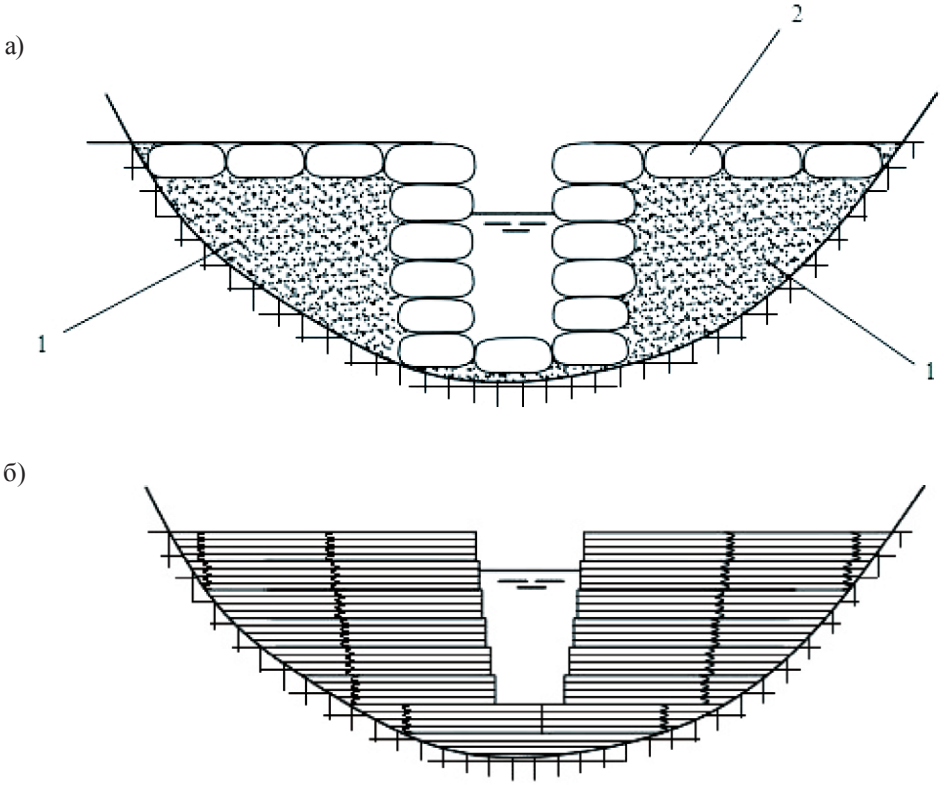


Рис. 6. Конструкции порогов в руслах рек: *а* — порог из мешков с песком и грунта (*1* — грунтовая насыпь; *2* — мешки с песком из геотекстиля); *б* — порог из фашинной кладки

Для удержания паводкового стока рассчитывается необходимое количество порогов, сооружаемых в русле реки:

$$n = \frac{W}{V} K, \tag{1}$$

где W — объем стока, поступающего в русло реки от дождевого паводка; K — степень задержки стока, рассчитывается исходя из безопасного расхода (K = 0,5 … 0,8); V — средний объем стока, задерживаемый одним порогом.

Средний объем, задерживаемый одним порогом, по формуле (2) рассчитывается исходя из высоты порога h, уклона склонов русла $i_с$ и уклона берегов $i_б$ (рис. 7).

$$V = F_п \frac{1}{3} l, \tag{2}$$

где $F_п$ — площадь русла, перекрываемого порогом; l — длина водохранилища-«ловушки».

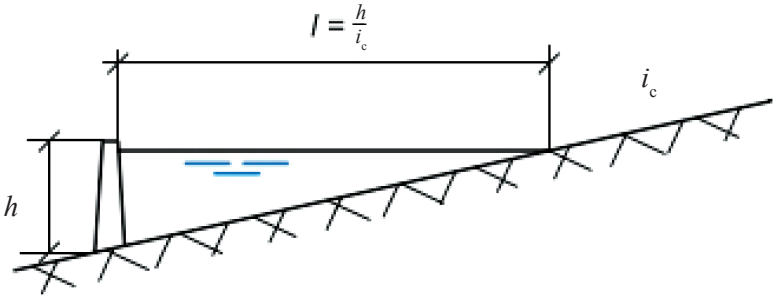


Рис. 7. Схема к расчету высоты порога в зависимости от уклона русла и длины водохранилища-«ловушки»

Площадь русла, перекрываемого порогом, по формуле (3) определяется высотой порога и уклоном боковых склонов $i_б$ (рис. 8):

$$F_п = \frac{h^2}{i_б}, \quad (3)$$

где h — высота порога; $i_б$ — уклон боковых склонов русла.

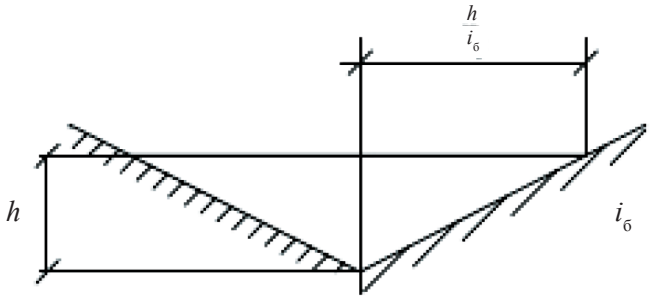


Рис. 8. Продольный профиль порога

Подставляя в формулу (2) значение $F_п$ из формулы (3), получим формулу объема водяного клина водохранилища-«ловушки»:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{h^3}{i_с i_б}. \quad (4)$$

Выводы

1. Западный опыт переформирования русел рек показал нерезультативность мер по расчистке русла с целью снижения паводкового уровня и доказывает эффективность использования «сухих» водохранилищ, обеспечивающих пропуск меженного расхода, для защиты от дождевых паводков.

2. Расчистка русла ведет к увеличению скорости потока и уменьшению коэффициента шероховатости русла, что приводит к резкому увеличению паводкового расхода и повышению уровня воды в зоне населенных пунктов, расположенных ниже участков расчистки.

3. Для снижения уровня паводка в населенных пунктах Краснодарского края (г. Сочи, Туапсе, Новороссийск, Крымск и др.) может быть эффективным проект противопаводковых водохранилищ-«ловушек», образуемых посредством строительства плотин или порогов из местных материалов, а также устройством в руслах притоков «сухих» водохранилищ.

4. Противопаводковая схема защиты, состоящая из «сухих» водохранилищ, расположенных на притоках, позволяет распределить прохождение паводка по времени и постепенно опорожнять водохранилища через саморегулирующиеся водосбросы, исключая внезапность поступления паводковых вод и предотвращая резкий подъем уровня воды в населенных пунктах.

5. Создавая в русле реки «сухое» водохранилище, можно задерживать значительный объем паводковой воды. Такая схема наиболее эффективна, если плотина возводится, перекрывая поток и формируя водохранилище на широкой пойме.

6. Рекомендуется составлять проект противопаводковых систем с учетом рельефа площади водосбора, степени разветвления речной сети, геологии берегов, склонов, уклонов основного русла и притоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макарова Л. Ю.* Регулирование паводков распределительной системой водохранилищ с учетом экологических факторов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.14.16. / Л. Ю. Макарова. — СПб., 1996. — 18 с.

2. *Колосов М. А.* Водохранилища-«ловушки» для защиты от наводнений / М. А. Колосов // Наука и жизнь. — 2003. — № 1. — С. 140–141.

3. Пат. 41739 Российская Федерация. МПК E 02 B 3/00. Система защиты от наводнений / В. С. Новиков; заявитель и патентообладатель В. С. Новиков. — № 2004121338/22; Заявлено 19.07.2004; Опубл. 10.11.2004, Бюл. № 31.

4. *Боровков С. В.* Регулирование стока рек фильтрующими плотинами: Дис.. … канд. техн. наук / С. В. Боровков. — СПб.: СПбГУВК, 2007.

5. *Rogger M.* Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story? / M. Rogger, B. Kohl, H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz, G. Blöschl // Journal of Hydrology. — 2012. — Vol. 456–457. — Pp. 30–43. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.05.068

6. *Dottori F.* Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping / F. Dottori, P. Salamon, A. Bianchi, L. Alfieri, F. A. Hirpa, L. Feyen // Advances in Water Resources. — 2016. — Vol. 94. — Pp. 87–102. DOI:10.1016/j.advwatres.2016.05.002.

7. *Villarini G.* On the seasonality of flooding across the continental United States / G. Villarini // Advances in Water Resources. — 2016. — Vol. 87. — Pp. 80–91. DOI:10.1016/j.advwatres.2015.11.009.

8. *Scholz M.* Guidance on variables characterising water bodies including sustainable flood retention basins / M. Scholz, Q. Yang // Landscape and Urban Planning. — 2010. — Vol. 98. — Is. 3–4. — Pp. 190–199. DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.08.002.

9. *Helms* M. Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe) river / M. Helms, B. Büchele, U. Merkel, J. Ihringer // Journal of Hydrology. — 2002. — Vol. 267. — Is. 1–2. — Pp. 94–114. DOI:10.1016/S0022-1694(02)00143-9.

10. *Schumann G. J.-P.* Technology: fight floods on a global scale / G. J.-P. Schumann, P. D. Bates, J. C. Neal, K. M. Andreadis // Nature. — 2014. — Vol. 507. — Is. 7491. — Pp. 169–169. DOI:10.1038/507169e.

11. *Schumann G. J.-P.* A first large scale flood inundation forecasting model / G. J.-P. Schumann, J. C. Neal, N. Voisin, K. M. Andreadis, F. Pappenberger, N. Phanthuwongpakdee, A. C. Hall, P. D. Bates // Water Resources Research. — 2013. — Vol. 49. — Is. 10. — Pp. 6248–6257. DOI: 10.1002/wrcr.20521.

12. *Pizarro* R. Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity / R. Pizarro, P. Garcia-Chevesich, R. Valdes, F. Dominguez, F. Hossain, P. Ffolliott, C. Olivares, C. Morales, F. Balocchi, P. Bro // Journal of Hydrology. —2013. — Vol. 481. — Pp. 56–63. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.12.012.

13. *Истомин В. И.* Наводнение в Крымске: причины и выводы / В. И. Истомин // Гидротехника. XXI век. — 2012. — № 4. — С. 52.

14. *Колосов М. А.* Водохранилища-«ловушки» в системе защиты от затопления г. Крымска / М. А. Колосов, Н. В. Селезнева // Гидротехника. — 2014. — № 1. — С. 123–125.

15. *Георгиевский В. Ю.* Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6 – 7 июля 2012 г. и его причины: Отчёт ФГБУ «ГГИ», ФГБУ «Краснодарский ЦГМС» / В. Ю. Георгиевский, Ю. Ю. Ткаченко. — 2012. — 42 с.

16. *Матишов Г. Г.* Кубанский паводковый кризис: климат, геоморфология, прогноз, Крымск, июль 2012 г.: пособие для спец. / Г. Г. Матишов, А. В. Клещенков // РАН, Южный науч. центр, Ин-т аридных зон, Мурманский. мор. биол. ин-т КНЦ. — Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. — 127 с.

17. *Колосов М. А.* «Веерная» система защиты от ливневых паводков / М. А. Колосов, Н. В. Селезнева // Гидротехника XXI век. — 2012. — № 4. — С. 53–56.

18. Пат. 2552361 РФ, МПК E 02 B 3/00, E 02 B 3/02, E 02 B 3/10. Противопаводковая фильтрующая плотина / М. А. Колосов, Н. В. Селезнева, А. А. Эйрус; заяв. и патентообладатель ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — № 2014108679/13; заявл. 05.03.2014; опубл. 10.06.2015. — Бюл. № 16.

19. *Колосов М. А.* Выявление потенциально опасных зон, подверженных дождевым паводкам и принципы инженерной защиты / М. А. Колосов, Н. В. Селезнева // Водные пути и русловые процессы: сб. науч. тр. — Вып. 2 / под ред. проф. Г. Л. Гладкова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 152–161.

RAINFALL FLOODS PROTECTION BY THE CHANNEL RAPID STRUCTURE

Methods of flood control actual for mountain regions are considered in the article.

There was adduced the Western experience on clearing riverbeds and efficiency of small catching water storage reservoirs delaying flood flow. Authors analyzed riverbed clearing effect and gave an explanation of

inefficiency of channel clearing for the increase of discharge capacity. Also authors computed the required cross-sectional dimensions of channel discharge necessary for experienced flood flow discharge of the Adagum river.

Recommended by authors flood control system of the Adagum river basin using temporary catching water reservoirs, formed by rapids or low dams that entrap the rainfall runoff in riverbed. Rapid constructions with consideration for free-flow of low summer discharge and fishway were adduced. Construction schemes of rapids can be built by different materials. Construction schemes of rapids with different forms of rapid spillways were adduced. Authors set out formulas for calculating the required number of rapids, constructed in the riverbed and the average amount of water retained in the reservoir formed by one rapid. Authors made a conclusion about the reliability of flood control system, consisting of a "dry" catching water reservoirs controlled flash flood runoff to a settlement.

Keywords: rainfall floods, regulation, flood control reservoirs, temporarily-filled reservoirs, rapids, dams, "dry" water reservoir.

REFERENCES

1. Makarova, L. Ju. Regulirovanie pavodkov raspredelitelnoj sistemoj vodohranilishh s uchetom jekologicheskih faktorov. Abstract of PhD diss. SPb., 1996.

2. Kolosov, M. A. "Vodohranilishha – «lovushki» dlja zashhity ot navodnenij." *Nauka i zhizn* 1 (2003): 140–141.

3. Novikov, V. S. RU 41 739 U1, IPC E 02 B 3/00. Sistema zashhity ot navodnenij. Russian Federation, assignee. Patent 41739. 19 July 2004.

4. Borovkov, S. V. Regulirovanie stoka rek filtrujushhimi plotinami. PhD diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 2007.

5. Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz, and G. Blöschl. "Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story?." *Journal of Hydrology* 456–457 (2012): 30–43. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.

6. Dottori, F., P. Salamon, A. Bianchi, L. Alfieri, F. A. Hirpa, and L. Feyen. "Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping." *Advances in Water Resources* 94 (2016): 87–102. DOI:10.1016/j.advwatres.2016.05.002.

7. Villarini, G. "On the seasonality of flooding across the continental United States." *Advances in Water Resources* 87 (2016): 80–91. DOI:10.1016/j.advwatres.2015.11.009.

8. Scholz, M., and Q. Yang. "Guidance on variables characterising water bodies including sustainable flood retention basins." *Landscape and Urban Planning* 98.3–4 (2010): 190–199. DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.08.002.

9. Helms, M., B. Büchele, U. Merkel, and J. Ihringer. "Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of diking measures along the Elbe (Labe) river." *Journal of Hydrology* 267.1–2 (2002): 94–114. DOI:10.1016/S0022-1694(02)00143-9.

10. Schumann, G. J.-P., P. D. Bates, J. C. Neal, and K. M. Andreadis. "Technology: fight floods on a global scale." *Nature* 507.7491 (2014): 169–169. DOI:10.1038/507169e.

11. Schumann, G. J.-P., J. C. Neal, N. Voisin, K. M. Andreadis, F. Pappenberger, N. Phanthuwongpakdee, A. C. Hall, and P. D. Bates. "A first large scale flood inundation forecasting model." *Water Resources Research* 49.10 (2013): 6248–6257. DOI: 10.1002/wrcr.20521.

12. Pizarro, R., P. Garcia-Chevesich, R. Valdes, F. Dominguez, F. Hossain, P. Ffolliott, C. Olivares, C. Morales, F. Balocchi, and P. Bro. "Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity." *Journal of Hydrology* 481 (2013): 56–63. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.12.012.

13. Istomin, V. I. "Navodnenie v Krymske: prichiny i vyvody." *Gidrotehnika. XXI vek* 4 (2012): 52.

14. Kolosov, M. A., and N. V. Selezneva. "Vodohranilishha – «lovushki» v sisteme zashhity ot zatoplenija g. Krymska." *Gidrotehnika* 1 (2014): 123–125.

15. Georgievskij, V. Ju., and Ju. Ju. Tkachenko. *Katastroficheskij pavodok v bassejne r. Adagum 6 – 7 ijulja 2012 g. i ego prichiny: Otchjot FGBU «GGI», FGBU «Krasnodarskij CGMS»*. 2012.

16. Matishov, G. G., and A. V. Kleshhenkov. *Kubanskij pavodkovyj krizis: klimat, geomorfologija, prognoz, Krymsk, ijul' 2012 g.: posobie dlja spec*. Rostov n/D: Izd-vo JuNC RAN, 2012.

17. Kolosov, M. A., and N. V. Selezneva. "«Veernaja» sistema zashhity ot livnevyh pavodkov." *Gidrotehnika XXI vek* 4 (2012): 53–56.

18. Kolosov, M. A., N. V. Selezneva, and A. A. Jejrus. RU 2 552 361 C1, IPC E 02 B 3/00, E 02 B 3/02, E 02 B 3/10. Protivopavodkovaja filtrujushhaja plotina. Russian Federation, assignee. Patent 2552361. 5 March 2014.

19. Kolosov, M. A., and N. V. Selezneva. "Vyjavlenie potencialno opasnyh zon, podverzhennyh dozhdevym pavodkam i principy inzhenernoj zashhity." *Vodnye puti i ruslovye processy: sb. nauch. tr. Vyp. 2*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015: 152–161.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kolosov-34@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru
Селезнёва Наталия Валерьевна — аспирант.
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
natalyselezneva@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kolosov Mihail Aleksandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kolosov-34@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru
Selezneva Natalija Valerevna — postgraduate.
Supervisor:
Kolosov Mihail Aleksandrovich.
natalyselezneva@mail.ru

Статья поступила 21 июня 2016 года

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-94-104
УДК 627.83

А. А. Коношенков

РАЗРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ В АВАРИЙНОМ ВОДОСБРОСЕ

В статье представлена конструкция аварийного трубчатого водосброса с грунтовой перемычкой, обеспечивающей быстрое включение системы при достижении в водохранилище критического уровня воды из-за паводков малой обеспеченности. Объясняется проблематичность расчёта разрушения грунтовой перемычки в рассмотренной конструкции водосброса. Проведён обзор конструкций аварийных и резервных водопропускных сооружений, содержащих вставки из грунтовых материалов, а также математические модели расчёта их разрушения. Также рассмотрены существующие математические модели разрушения грунтовых плотин, модели формирования прорана. Проанализирована возможность применения существующих моделей для расчёта разрушения грунтовой перемычки представленной конструкции. Составлена модель расчёта разрушения грунта с помощью метода электрогидродинамических аналогий. Выполнены графики определения критического разрушающего напора для грунтовых перемычек. Предложен алгоритм разрушения грунтовой перемычки в течение времени.

Ключевые слова: паводок малой обеспеченности, водосброс, грунтовая перемычка, метод ЭГДА.

Введение

Аккумуляция и пропуск паводкового расхода — одна из наиважнейших проблем в современной гидротехнике. Интересы гидроэнергетики требуют как можно более быстрого наполнения водохранилища до проектной отметки после периода сработки водохранилища, что приводит к неготовности его принять паводок обеспеченности меньше 1 % (рис. 1) из-за уже заполненного объёма. В данной ситуации очень важно пропустить паводок, чтобы избежать перелива воды через гребень гидроузла.

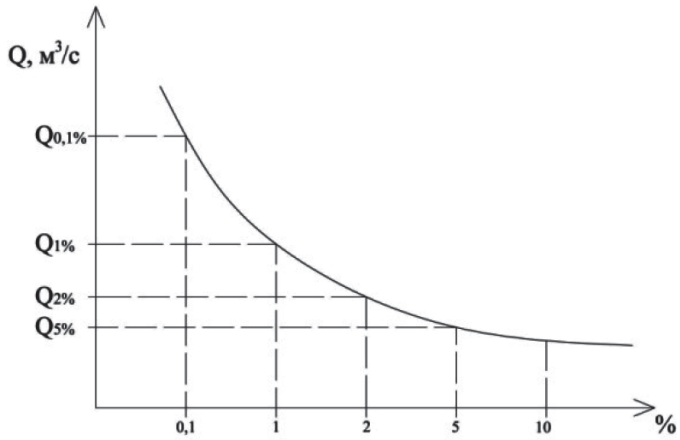


Рис. 1. Кривая обеспеченности расхода воды в реке

Одним из путей решения такой проблемы как пропуск паводка через створ гидроузла является строительство аварийного берегового водосброса, способного пропускать значительные расходы и исключить перелив через гребень плотины судоходного гидроузла. Конструкция, которую можно использовать для решения данной проблемы, представляет собой трубчатый водосброс с грунтовой перемычкой (рис. 2) [1].

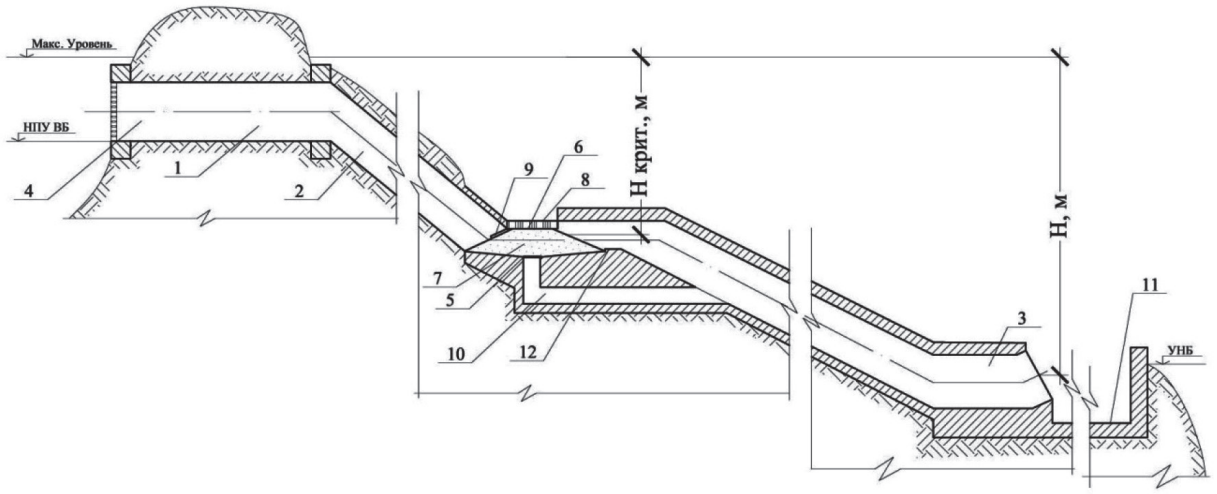


Рис. 2. Конструкция предлагаемого водосброса
для судоходных гидроузлов

Устройство включает трубопровод *1* с наклонным *2* и водовыпускным *3* отрезками. В оголовке водоприемного отрезка установлена сороудерживающая решётка *4* или щелевой водозабор. Между наклонным *2* и водовыпускным *3* отрезками трубопровода смонтирована площадка *5*. Над площадкой *5* выполнено отверстие *6* для загрузки песчаной вставки *7*, закрываемое после окончания операции крышкой *8*. Нижняя поверхность крышки *8* вплотную прилегает к песчаной вставке *7*, что создает надежную пробку для некритических напоров воды. На краю загрузочного отверстия *6* со стороны наклонного отрезка трубопровода установлена поворотная заслонка *9*. На дне площадки *5* установлена решетка с геотекстилем, через которую трубопровод сообщается с дренажным колодцем *10*, отводящим воду в водобойный колодец *11*.

Наиболее сложным элементом для расчёта данной конструкции является грунтовая перемычка, так как грунт является анизотропной системой, физико-механические характеристики которой могут изменяться с течением времени. В связи с этим отсутствует единая математическая модель разрушения грунта.

Обзор

Существуют идеи создания водопропускных сооружений с перемычкой из песка. Одной из таких идей является конструкция П. М. Богославчика [2], [3]. Водосбросное сооружение является резервным, входит в состав напорного фронта в виде секции грунтовой стороны напорного фронта, выполнена полая упорная бетонная призма, прикрепленная к флютбету, а грунтовая вставка выполнена из материала с плотностью меньше, чем у материала тела самой плотины. Пустотелая упорная бетонная призма выполнена шириной, равной ширине грунтовой вставки, закрепленной на бетонном флютбете, что позволяет гасить кинетическую энергию пропускаемого через сооружение сбросного потока за счет формирования системы двух соударяющихся потоков в пределах флютбета (рис. 3).

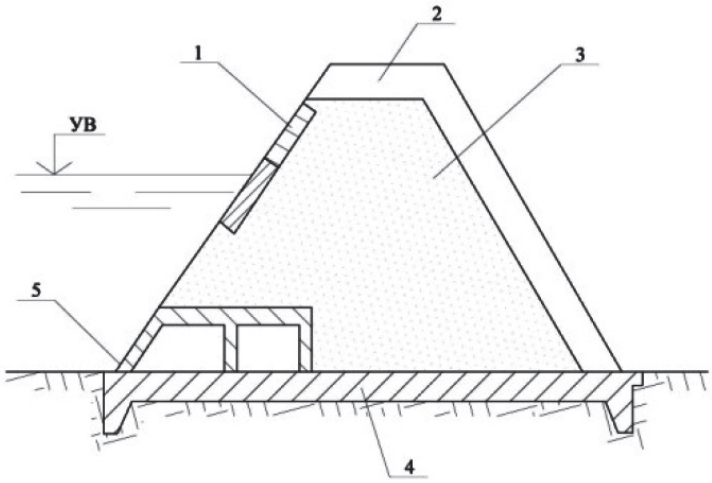


Рис. 3. Конструкция размываемой перемычки:
1 — крепепление откоса; *2* — тело плотины*; 3* — грунтовая размываемая вставка;
4 — бетонный флютбет*; 5* — пустотелая упорная призма

Выполнение тела грунтовой вставки из материала, имеющего плотность меньше, чем у материала тела самой плотины, позволяет получить сокращение времени размыва вставки в период пропуска расхода. Это позволяет повысить эффективность работы самого сооружения напорного фронта грунтовой плотины. При помощи плит производится защита верхового откоса от воздействия волн и льда. При этом грунтовая вставка, расположенная между бетонными устоями, до достижения критического уровня работает как грунтовая плотина.

При необходимости пропуска расходов малой обеспеченности, когда пропускная способность основного водосброса становится недостаточной, уровень воды в верхнем бьефе повышается до отметки форсированного уровня, и происходит перелив воды через грунтовую вставку, сопровождающийся ее полным размывом в пределах ограниченных флютбетом и устоями (рис. 4). Таким образом открывается более широкий водосливной фронт, обеспечивающий пропуск необходимого расхода. При этом размыв грунтовой вставки исключает перелив воды через гребень плотины. Значительное гашение кинетической энергии всего сбрасываемого потока предотвращает размыв грунта в нижнем бьефе. По окончании паводка грунтовая вставка восстанавливается до первоначальных размеров.

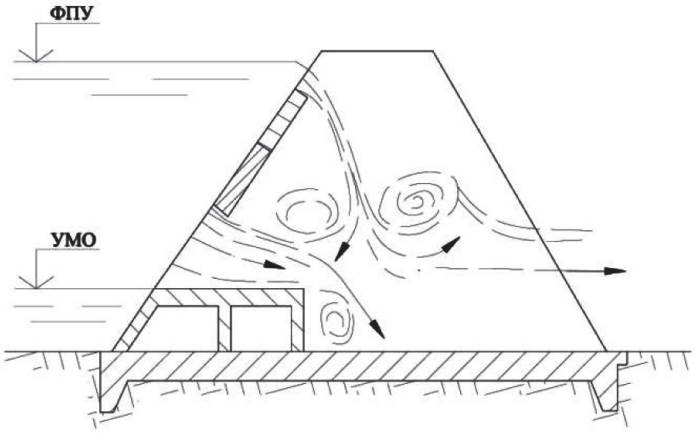


Рис. 4. Размыв грунтовой перемычки

Перелив воды через гребень происходит в режиме, близком к режиму водослива с практическим профилем. Опыты П. М. Богославчика были повторены И. Ф. Пикаловой и Т. В. Наумовой [4], результаты опытов имеют высокую корреляцию (рис. 5 и 6).

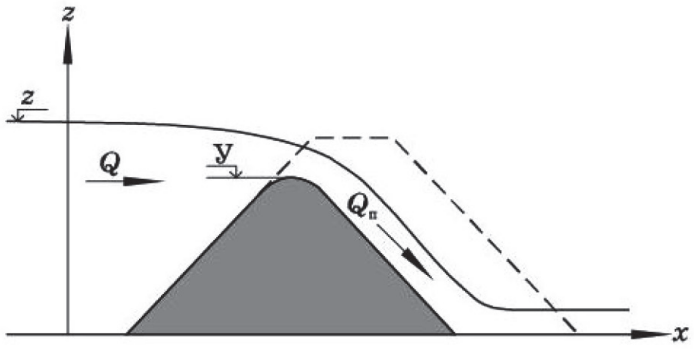


Рис. 5. Схема размыва перемычки из грунта

Коэффициент расхода водослива определяется по формуле

$$m = \frac{Q_n}{b\sqrt{2g}\cdot H^{3/2}}, \qquad (3)$$

где $Q_п$ — расход поверхностного потока воды; b —ширина размываемой вставки; g = 9,81 м/с^2 — ускорение свободного падения; H, м — напор воды над вставкой из грунта.

По результатам опытов была получена графическая зависимость H/P, где P, м — высота размываемой перемычки из грунта.

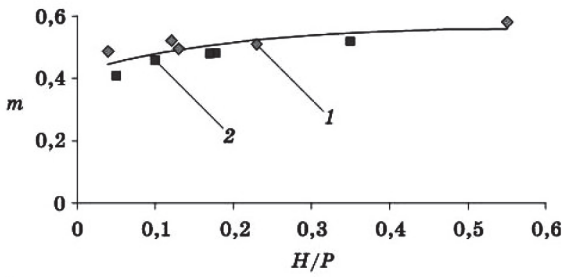


Рис. 6. График зависимости $m = f(H,P)$:
1 — опыты П. М. Богославчика*; 2* — опыты И. Ф. Пикаловой и Т. В. Наумовой

Ещё одной конструкцией аварийного паводкового водосброса с размываемой вставкой является система, предложенная Ю. М. Косиченко и Е. Д. Михайловым [5] – [7]. Водосброс представляет собой искусственный проран трапецеидального сечения в теле грунтовой плотины, в основании которого уложено покрытие из геомембраны, предотвращающее размыв плотины. Отметка порога искусственного прорана устанавливается выше нормального подпорного уровня в водохранилище, но ниже форсированного подпорного уровня. Размеры искусственного прорана назначаются, исходя из условий пропуска максимального расчётного паводкового расхода. Ширина искусственного прорана b для аварийного водосброса определяется по формуле

$$b = \frac{\Delta Q}{\varepsilon \cdot \varphi \cdot k\sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_0 \cdot H, \qquad (4)$$

где ΔQ — расчётный паводковый расход через искусственный проран, м^3/с; g = 9,81 м/с^2 — ускорение свободного падения; H — напор воды на входе, м; ε, φ, k — коэффициенты бокового сжатия, скорости и пространственного истечения; m_0 — коэффициент заложения откоса (рис. 7).

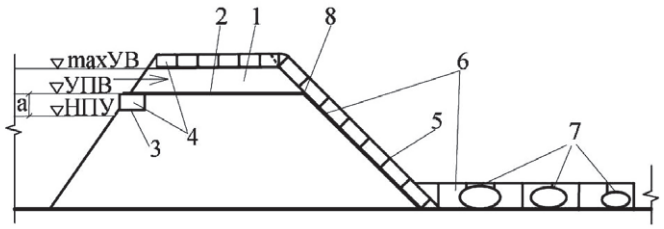


Рис. 7. Продольный разрез конструкции с искусственным прораном:
1 — искусственный проран в теле грунтовой плотины; *2* — защитное покрытие из геомембраны; *3* — приямки; *4* — балласт; *5* — полотнище из геомембраны; *6* — гибкие оболочки, заполненные песком; *7* — гасители энергии потока; *8* — сварной шов

Механизм разрушения грунтовой перемычки в искусственном проране заключается в воздействии на частицы грунта переливающегося потока, скорость которого будет больше размывающей скорости, причём наиболее активный размыв происходит в низовой грани откоса. Одновременно с поверхностным размывом происходит активный фильтрационный размыв, проходящий по основанию вставки, выполненному из геоматериала с коэффициентом фильтрации, достигающим 60 – 100 м/сут в горизонтальном направлении (рис. 8).

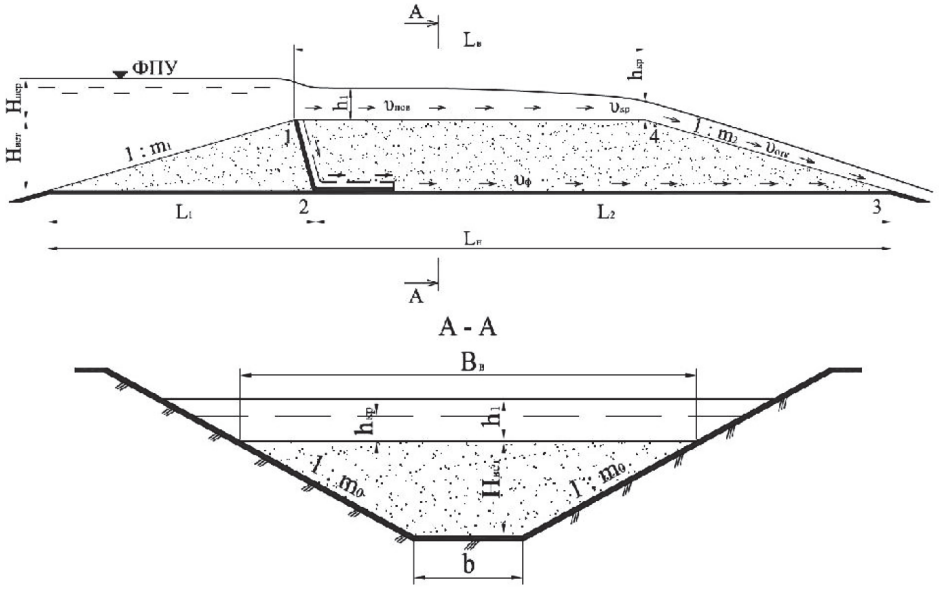


Рис. 8. Расчётная схема размыва грунтовой вставки в искусственном проране.
Продольное и поперечное сечения грунтовой вставки

Расход поверхностного потока Q определяется по формуле

$$Q = m(b + 2m_0 H_{вст} + m_0 h_1) h_1 \sqrt{2gH_{пер}}\ , \quad (5)$$

где b — ширина грунтовой вставки по основанию, м; g = 9,81 м/с² — ускорение свободного падения; $H_{вст}$ — высота грунтовой вставки, м; h_1 — глубина на водосливе до начала размыва вставки, м; $H_{пер}$ — напор переливающегося потока перед грунтовой вставкой, м; m — коэффициент расхода для широкого водослива, определяемый по формуле

$$m = 0{,}301 + 0{,}0603\sigma, \quad (6)$$

где σ — относительная высота порога водослива.

Существуют также математические и гидравлические модели формирования прорана в теле грунтовой плотины. Исследования этого вопроса описаны в работах А. М. Прудовского и К. Р. Пономарчук [8] – [12]. По результатам гидравлического моделирования получен порядок развития прорана в однородной грунтовой плотине (вставке).

На участке начального перелива через гребень сооружения начинается снос грунта на низовой грани. После чего размыв начинает распространяться в сторону гребня, на низовом же откосе образуется ложбина. Наполнение этой ложбины приводит к расширению прорана и увеличению расхода воды через него. Боковые откосы начинают терять устойчивость, что приводит к развитию прорана не только из-за смыва грунта с обтекаемых поверхностей, но и из-за обрушения откосов прорана. По достижении дном прорана основания плотины поперёк её подошвы начинается вторая стадия развития: боковое расширение прорана. Масса грунта во взвешенном состоянии обрушается в проран, причём часть сносится потоком в нижний бьеф, а другая оседает у основания откоса. Развитие прорана приводит к опорожнению водохранилища, уровень воды которого начинает падать. Вследствие напора, уменьшается расход воды сквозь прорыв, уменьшается интенсивность развития прорана. Расширение прорана прекращается либо при опорожнении водохранилища, либо при достижении значений скоростей потока меньше размывающей скорости для материала, складывающего откосы плотины. По итогам гидравлического моделирования были построены графики изменения во времени ширины прорана $B_t = B(t)$. На основании этих графиков была выведена эмпирическая формула развития ширины прорана B от времени t:

$$\frac{dB}{dt} = 0{,}035 \cdot \frac{g^{1/2} \cdot h_t^{9/2}}{W_{уд}^2}, \quad (7)$$

где g = 9,81 м/с² — ускорение свободного падения; $W_{уд}$ — площадь поперечного сечения плотины между её гребнем и дном прорана; h_t — разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана (действующий напор на проране).

В исследованиях разрушения грунта в проране С. Г. Косарева [13], [14] вводятся допущения: расход потока воды через проран определяется по формуле водослива без порога, а сечение прорана принимается прямоугольным на участке развития от гребня до основания плотины. Размыв плотины осуществляется только до его основания. Первоначальная ширина размыва в проране при переливе через гребень принимается B_1=1,0 м. Площадь зеркала водохранилища $\Omega_{вз}$ является постоянной и равной отношению начального объёма водохранилища V_1 к начальному напору H_1. Ширина прорана в любой момент времени определяется по формуле

$$B_{i+1} = B_i + \frac{\Delta W_i}{\Omega_{пл}}, \quad (8)$$

где ΔW_i — объём грунта, вынесенного из тела плотины за период времени t_i.

Результаты исследования

Существующие модели формирования прорана в теле грунтовой плотины (вставки), а также модели разрушения грунта в резервных водосбросах с грунтовой вставкой исходят из принципа поверхностного перелива. Этот перелив через гребень плотины вызывает размыв в нижней части

перемычки, но так как в предложенной конструкции грунтовая вставка находится в состоянии пробки, т. е. отсутствует поток над гребнем перемычки, использовать напрямую эти модели невозможно.

Для того чтобы получить условия разрушения грунтовой перемычки в конструкции трубчатого водосброса, было выполнено исследование фильтрационного режима на аппарате ЭГДА. Была построена гидродинамическая сетка для перемычек (грунтовых вставок) с различными характеристиками: $b_{гр}$ — ширина вставки по гребню, м; $h_{вст}$ — высота грунтовой вставки; угол заложения откоса от 20 до 35° (рис. 9).

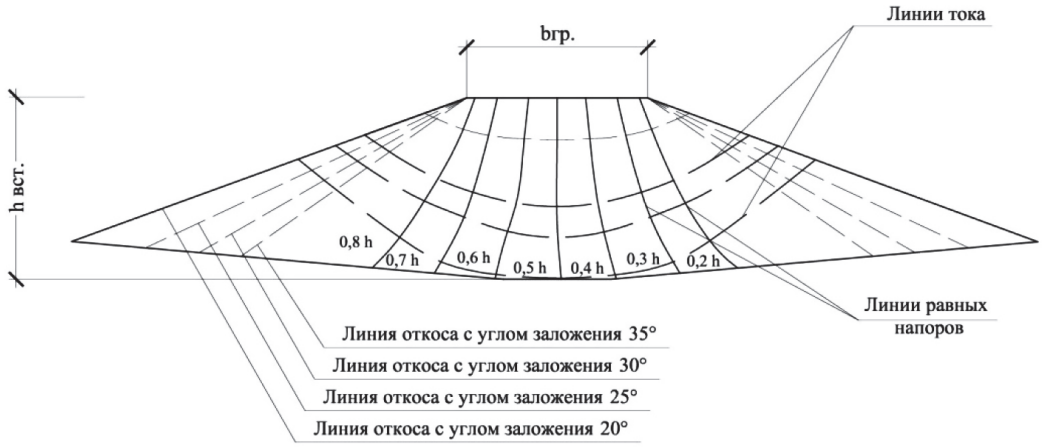


Рис. 9. Расчётная схема размыва грунтовой вставки в трубчатом водосбросе

Для грунтовых перемычек определяется положение линий равных напоров: 0,8h, 0,7h, 0,6h, 0,5h, 0,4h, 0,3h, 0,2h. После построения линий равных напоров, по принципу ортогональности строятся линии тока. Поворотная заслонка (см. рис. 9) позволяет «обрубить» линии тока в верхней части грунтовой вставки. По линиям тока можно получить эпюру градиентов фильтрации. Благодаря отсутствию линий тока в верхней части перемычки, эпюра градиентов фильтрации располагается не на всём протяжении откоса, а только в средней его части. Ниже линий тока находится «мёртвый объём» — часть грунта, не участвующая в фильтрационном режиме (рис. 10).

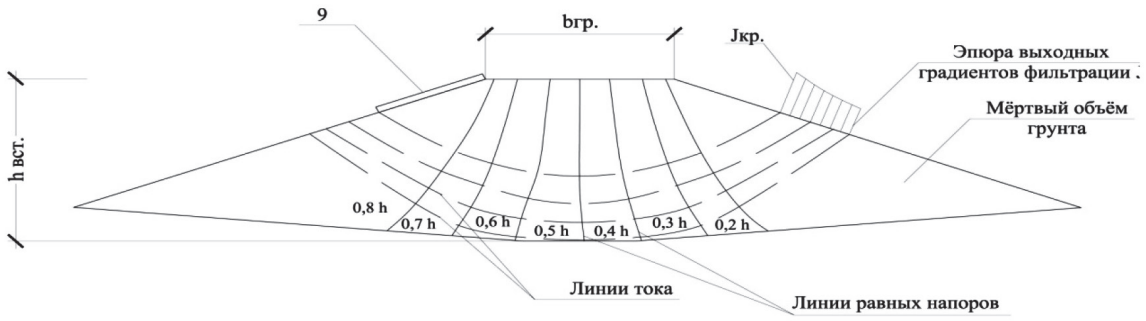


Рис. 10. Положение эпюры выходных градиентов фильтрации

Выходные градиенты определяются по формуле

$$J = \frac{0{,}2h}{l}, \tag{9}$$

где l — длина участка линии тока между линией равного напора 0,2h и линией откоса; J — выходной градиент фильтрации.

Так как необходимо найти разрушающий перемычку максимальный напор $H_{крит}$, зависящий от критического градиента фильтрации $J_{кр}$, можно заменить h на $H_{крит,}$ а J на $J_{кр}$.

$$H_{крит} = 5 \cdot J_{кр} \cdot l. \quad (10)$$

Согласно СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов», значение критических средних градиентов напора для мелкого песка соответствуют 0,75, а для среднего песка — 1,0 [15]. Как видно, более выгодными, с точки зрения наиболее высокого критического напора, являются грунтовые перемычки с углом заложения откоса 20°, выполненные из среднего песка с критическим градиентом фильтрации 1,0 (рис. 11).

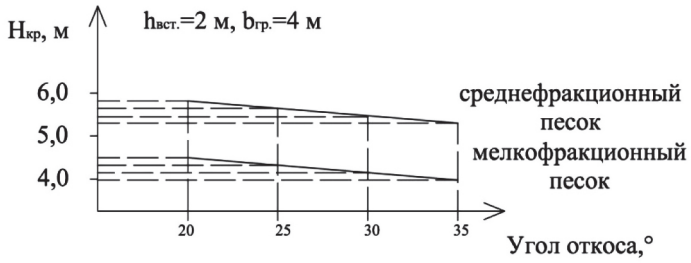


Рис. 11. Зависимость критического напора от угла заложения откоса и значения критического градиента фильтрации

На основании метода ЭГДА получены графики $H_{крит}$ — критического разрушающего напора для перемычек с углом заложения откоса 20°, сложенных из среднефракционного песка с шириной гребня $b_{гр}$ от 1,0 м до 4,0 м, — высотой вставки $h_{вст}$ от 1,0 до 4,0 м (рис. 12).

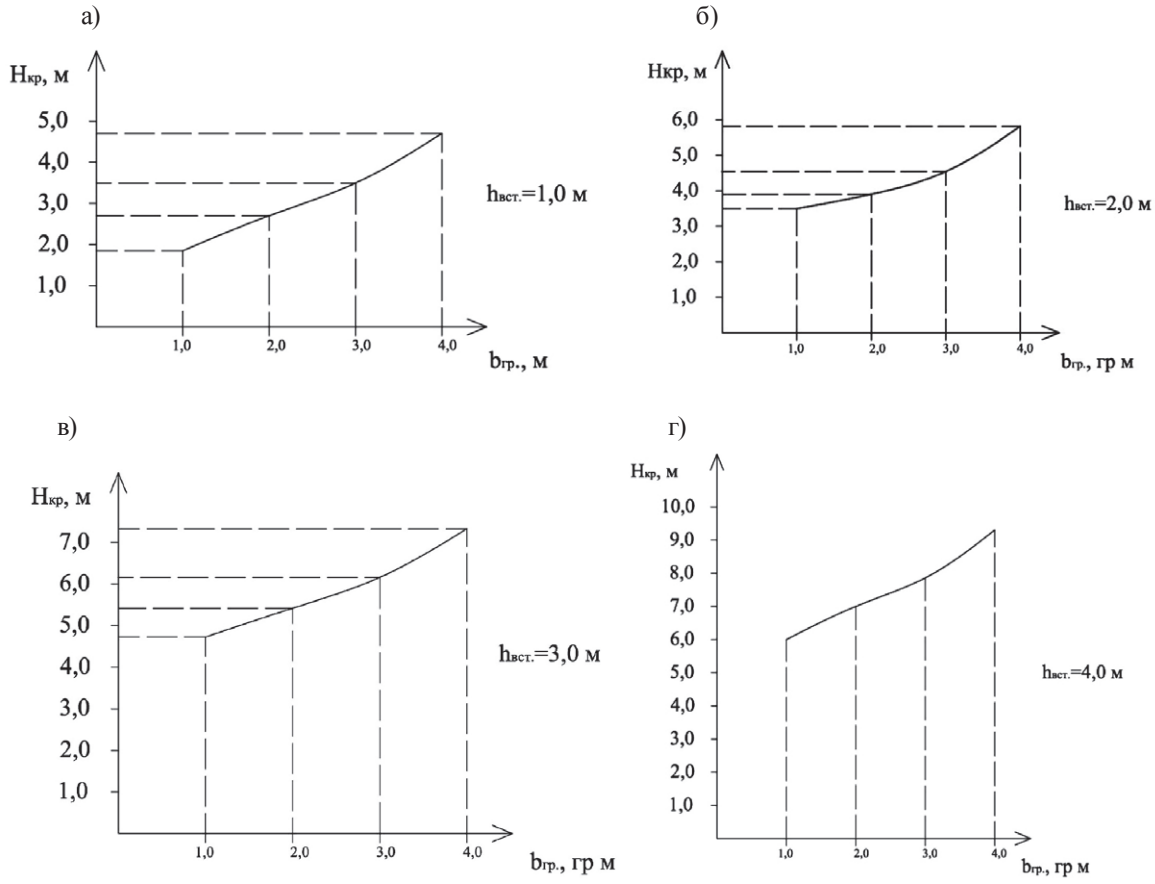


Рис. *12.* Зависимость критического напора для перемычки:
а — высотой 1,0 м; *б* — высотой 2,0 м; *в* — высотой 3,0 м; *г* — высотой 4,0 м

Разрушение грунтовой перемычки проходит по следующему предполагаемому сценарию (рис. 13). На первой стадии в зоне выпора грунта вдоль линии тока по критическому градиенту фильтрации происходит активный вынос частиц грунта. Этот процесс приводит к оползанию грунта в зоне обрушения откоса. Активный вынос грунта происходит до полного оползания откосов из зоны выше линии максимального градиента. Освобождение зоны обрушения от грунта приводит к повороту заслонки и началу второй стадии разрушения. Во время второй стадии разрушения грунтовой перемычки начинается перелив через оставшуюся часть грунта, что приводит к быстрому размыву. Быстрый размыв перемычки обусловлен большим напором и скоростями воды много выше размывающей. На этапе поверхностного размыва грунтовой вставки возможно использование схем размыва из конструкций П. М. Богославчика, а также Ю. М. Косиченко и Е. Д. Михайлова. Формулы развития прорана (7), (8) также возможно применить на стадии поверхностного размыва.

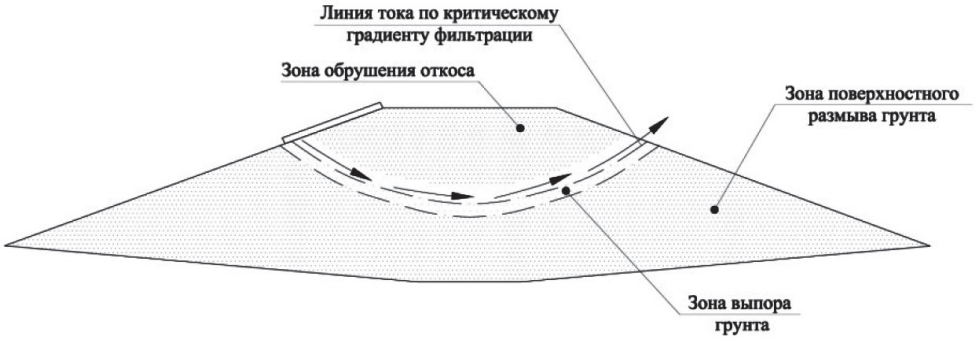


Рис. 13. Зоны разрушения грунтовой перемычки

Выводы

Наиболее сложным в расчёте представленного аварийного трубчатого водосброса является грунтовая перемычка. Анизотропия грунта как системы приводит к отсутствию единой математической модели разрушения. По этой причине был проведён анализ существующих водопропускных сооружений с грунтовыми перемычками (вставками). Анализ показал, что в существующих конструкциях используется схема поверхностного размыва. В предложенной конструкции поверхностный размыв изначально отсутствует, так как грунтовая вставка работает на выпор, поэтому полностью применить опыт гидравлического и математического моделирования описанных конструкций не представляется возможным. Проведённый анализ моделей развития прорана в теле плотины показал, что и математические модели прорана исходят из принципа поверхностного разрушения, как следствие — отсутствие возможности полного применения моделей к предложенной конструкции.

Представлены результаты моделирования методом ЭГДА. На основе полученных моделированием линий тока для множества профилей грунтовых вставок получены графики зависимости критического напора от высоты перемычки и ширины гребня. На основе линий тока сделан вывод о сценарии разрушения грунтовой перемычки: активного выноса грунта на первой стадии и поверхностного размыва на второй стадии. Сделан вывод о возможности использования существующих математических моделей разрушения на второй стадии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колосов М. А.* Разработка конструкции водосброса для судоходных гидроузлов / М. А. Колосов, А. А. Коношенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 71–78.

2. *Богославчик П. М.* Резервные водосбросы с размываемыми грунтовыми вставками на малых водохранилищах и прудах гидромелиоративных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук (06.01.02) / П. М. Богославчик. — Минск: Белорус. НИИ мелиорации и вод. хоз-ва, 1986. — 22 с.

3. *Богославчик П. М.* Динамика размыва плотины из местных материалов при переливе воды / П. М. Богославчик, И. В. Филипович // Известия ВУЗов СССР: Серия Энергетика. — 1982. — № 3. — С. 88–93.

4. *Пикалова И. Ф.* Гидравлические исследования размываемых грунтовых вставок резервных водосбросов / И. Ф. Пикалова, Т. В. Наумова // Природообустройство. — 2015. — № 1. — С. 47–50.

5. *Косиченко Ю. М.* Применение резервных водосбросов в грунтовых плотинах для пропуска паводковых расходов / Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. — 2014. — № 2 (14). — С. 124–137.

6. *Косиченко Ю. М.* Методика расчёта параметров резервного водосброса с размываемой вставкой / Ю. М. Косиченко, Е. Д. Михайлов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. — 2014. — № 4 (16). — С. 176–189.

7. *Михайлов Е. Д.* Гидравлическая оценка эффективности сработки грунтовой вставки резервного водосброса / Е. Д. Михайлов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура — 2016. — № 1 (22). — С. 27–33.

8. *Прудовский А. М.* Образование прорана при прорыве земляной плотины / А. М. Прудовский, К. Р. Пономарчук // Экологические проблемы водного хозяйства и мелиорации: материалы науч.-практ. конф. — М.: МГУП, 2000. — С. 99–100.

9. *Прудовский А. М.* Образование прорана при прорыве земляной плотины / А. М. Прудовский // Безопасность энергетических сооружений. — 1998. — № 2. — С. 67–69.

10. *Пономарчук К. Р.* Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины // Природообустройство. — 2011. — № 3. — С. 77–82.

11. *Пономарчук К. Р.* Экспериментальные исследования процесса разрушения грунтовых плотин / К. Р. Пономарчук, А. М. Прудовский // Гидротехническое строительство. — 1997. — № 4. — С. 5.

12. *Пономарчук К. Р.* Оценка влияния раскрытия прорана в грунтовой плотине на гидравлический режим нижнего бьефа / К. Р. Пономарчук // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК». Ч I. — М.: МГУП, 2007. — С. 273.

13. *Косарев С. Г.* Обоснование выбора расчетной зависимости для определения транспорта наносов в процессе развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин / С. Г. Косарев // Гидротехническое строительство. — 2012. — № 4. — С. 13–16.

14. *Косарев С. Г.* Методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин вследствие возникновения аварийных ситуаций / С. Г. Косарев // Гидротехническое строительство. — 2012. — № 4. — С. 17–20.

15. СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. — М., 2012. — 87 с.

FORMULATION OF CALCULATION MODEL OF GROUND COFFERDAMS DESTRUCTION IN THE EMERGENCY SPILLWAY

The article presents the tubular spillway with the ground cofferdam that provides quick start when the water storage reservoir reaches the critical water level in the case of floods with small outflow probability. Difficulty of calculation of destruction of reviewed ground cofferdam is explained. Overview of the constructions of reserve spillways, that contain ground cofferdams, and the mathematical models of calculations their destructions is made. The existing mathematical models of ground cofferdams destructions are also considered. The opportunity of possible using the existing calculation models for presented ground cofferdams destruction is analyzed. The calculation model for ground cofferdams destructions is made by the electric analogy method. The article presents the schedules of critical destroying pressure for ground cofferdams definition. The algorithm of ground cofferdams destruction during time is suggested.

Keywords: floods with small outflow probability, spillway, ground cofferdams, electric analogy method.

REFERENCES

1. Kolosov, Mihail Aleksandrovich, and Aleksandr Alekseevich Konoshenkov. “Engineering spillway construction for navigable hydrosystem.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 71–78.

2. Bogoslavchik, P. M. Rezervnye vodosbrosy s razmyvaemymi gruntovymi vstavkami na malyh vodohranilishhah i prudah gidromelioprativnyh system. Abstarct of PhD diss. Minsk: Belorus. NII melioracii i vod. hoz-va, 1986.

3. Bogoslavchik, P. M., and I. V. Filipovich. "Dinamika razmyva plotiny iz mestnyh materialov pri perelive vody." *Izvestija VUZov SSSR: Serija Jenergetika* 3 (1982): 88–93.

4. Pikalova, I. F., and T. V. Naumova. "Hydraulic tests of scoured soil isertions of reserve spillways." *Prirodoobustrojstvo* 1 (2015): 47–50.

5. Kosichenko, Yuriy Mikhaylovich, and Yevgeniy Dmitriyevich Mikhaylov. "Reserve spillway in earth dams for passing flood discharges." *Scientific Journal of Russian Research Institute of Land Improvement Problems* 2(14) (2014): 124–137.

6. Kosichenko, Yuriy Mikhaylovich, and Yevgeniy Dmitriyevich Mikhaylov. "Method for calculating the parameters of reserve spillway with scoured insert." *Scientific Journal of Russian Research Institute of Land Improvement Problems* 4(16) (2014): 176–189.

7. Mikhaylov, Evgeny. "Hydraulic performance evaluation of drawdown dirt insert of a reserve water outlet." *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture* 1(22) (2016): 27–33.

8. Prudovskij, A. M. and K. R. Ponomarchuk. "Obrazovanie prorana pri proryve zemljanoj plotiny." *Jekologicheskie problemy vodnogo hozjajstva i melioracii: materialy nauchno-prakticheskoj konferencii*. M.: MGUP, 2000: 99–100.

9. Prudovskij, A. M. "Obrazovanie prorana pri proryve zemljanoj plotiny." *Bezopasnost jenergeticheskih sooruzhenij* 2 (1998): 67–69.

10. Ponomarchuk, K. R. "Assessment of parameters of closure channel development at destruction of earth dams." *Prirodoobustrojstvo* 3 (2011): 77–82.

11. Ponomarchuk, K. R. and A. M. Prudovskij. "Jeksperimentalnye issledovanija processa razrushenija gruntovyh plotin." *Power Technology and Engineering* 4 (1997): 5.

12. Ponomarchuk, K. R. "Ocenka vlijanija raskrytija prorana v gruntovoj plotine na gidravlicheskij rezhim nizhnego befa." *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Rol prirodoobustrojstva selskih territorij v obespechenii ustojchivogo razvitija APK»*. Part I. M.: MGUP, 2007: 273.

13. Kosarev, S. G. "Obosnovanie vybora raschetnoj zavisimosti dlja opredelenija transporta nanosov v processe razvitija prorana v tele odnorodnyh zemljanyh namyvnyh plotin." *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo* 4 (2012): 13–16.

14. Kosarev, S. G. "Metodika rascheta razvitija prorana v tele odnorodnyh zemljanyh namyvnyh plotin vsledstvie vozniknovenija avarijnyh situacij." *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo* 4 (2012): 17–20.

15. Russian Federation. Set of rules SP 39.13330.2012 Plotiny iz gruntovyh materialov. M., 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коношенков Александр Алексеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
a.konoshenkov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konoshenkov Aleksandr Alekseevich — postgraduate.
Supervisor:
Kolosov Mihail Aleksandrovich — Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
a.konoshenkov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

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

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-105-113
УДК 534.121.1: 629.12: 519.63

М. В. Сухотерин,
С. О. Барышников,
Д. А. Аксенов

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОНКИХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящей статье приводится решение задачи о собственных колебаниях защемленной по контуру тонкой прямоугольной пластины с помощью двух гиперболотригонометрических рядов по двум координатам, удовлетворяющих основному дифференциальному уравнению задачи. При выполнении всех граничных условий получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений относительно четырех последовательностей неизвестных коэффициентов рядов, которая сведена к бесконечной системе относительно одной последовательности коэффициентов, содержащей в качестве параметра частоту колебаний. Перебором этого параметра с меняющимся шагом находятся частоты, дающие нетривиальные решения бесконечной системы, т. е. собственные частоты. Полученный спектр собственных частот сравнивается с аналогичными частотами, найденными другими авторами. Анализируется точность вычислений и эффективность применяемых приближенных методов. Показано, что собственные частоты, найденные в настоящей работе предложенным методом, являются весьма точными при удержании в рядах 49 членов. Установлено, что дальнейшее увеличение количества членов в рядах практически не влияет на точность вычисления собственных частот.

Ключевые слова: собственные колебания, прямоугольная защемленная пластина, ряды Фурье, численные результаты.

Введение

Защемленная по всему контуру прямоугольная пластина является расчетной схемой многих плоских элементов в судостроении. Это прежде всего обшивка судна, элементы палубного настила, переборки, днищевые панели и др. Подобные пластины используются также в авиастроении, в гидротехническом и гражданском строительстве. При проведении динамических расчетов исследователей интересуют, в первую очередь, собственные частоты и соответствующие формы колебаний пластины. Многие элементы приборов и других конструкций «работают» по резонансному принципу, для других же элементов резонансные частоты (диапазоны) опасны. В некоторых случаях резонансные явления могут происходить не только на основной частоте, но и на обертонах.

Находят применение указанные пластины и в нанотехнике. Высокая точность вычисления собственных частот колебаний прямоугольных пластин, защемленных по контуру, требуется при создании современных прецизионных электромеханических преобразователей (биморфные пьезоэлементы в системах юстировки и позиционирования различных оптикомеханических систем) и анализе качества их функционирования, а также при создании микроплат в электронике. Данная задача не имеет точного решения в замкнутой форме, поэтому известные приближенные решения оставляют открытым вопрос о их точности.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма определения спектра собственных частот и сравнение полученных значений с результатами других авторов, а также оценка точности применяемых методов.

Первые численные результаты определения собственных частот колебаний защемленной по контуру квадратной пластины были получены в работах K. Sezawa [1], S. Tomatica [2] и S. Igushi [3] методом рядов. Например, S. Igushi использовал комбинации шести степенных и тригонометрических функций, удовлетворяющих граничным условиям. В дальнейшем многие исследователи обращались к этой задаче, пытаясь уточнить известные численные результаты с помощью тех или

иных приближенных методов, а также получить значения более высоких тонов колебаний. Широкое применение получил *метод Ритца* (или Релея–Ритца). D. Young [4] представлял решение в виде степенного ряда с девятью членами. А. П. Филиппов [5] выбирал решение в виде конечного ряда из 20 ортонормированных полиномов Лежандра. A. Leissa [6] использовал двойной степенной ряд с 36 слагаемыми. S. Dickinson и E. Li [7] применяли ортогональные полиномы из решения для свободно опертой пластины. R. Bhat [8], а также K. Liev и др. [9] находили собственные частоты с использованием специальных ортогональных полиномов, которые с помощью процедуры Грама–Шмидта (Gram–Schmidt) ускоряют процесс аппроксимации в методе Релея–Ритца. R. Bhat и др. [10] для сравнения решали задачу еще тремя методами: методом Рэлея–Ритца с функцией формы, которая включает две экспоненты, определяемые минимизацией фундаментальных частотных коэффициентов, оптимальным методом Канторовича и методом конечных элементов (МКЭ).

С. В. Нестеров [11] решал задачу вариационным методом с помощью функций Крылова. Им были построены аналитические выражения для вычисления собственных частот и форм колебаний. S. Odman [12] применял метод, близкий к методу Галеркина. В справочнике Д. В. Вайнберга [13] приводятся, по-видимому, результаты S. Igushi [3]. В. В. Болотин [14] использовал *асимптотический метод*, представляя искомое решение суммой внутреннего решения и поправочных решений, учитывающих динамический краевой эффект. N. Bardell [15] применял МКЭ — аппроксимирующая функция содержала 10×10 полиномов по двум координатам, исследовалась зависимость собственных частот от коэффициента Пуассона. Автором были получены лишь первые три частоты. Y. Kerboua и др. [16] использовали полуаналитический гибридный МКЭ в сочетании с теорией оболочек Сандерса.

В работах C. Ng и др. [17], а также X. Wang и S. Xu [18] собственные частоты находились *методом дискретных сингулярных сверток* (DSC). C. Shu и H. Du [19], а также R. Saini и R. Lal [20] решали задачу с помощью обобщенных дифференциальных квадратур (GDQ).

S. Reutsky [21] применял *метод фундаментальных решений* основного дифференциального уравнения задачи, который относится к приближенным бессеточным методам. Коэффициенты ряда по фундаментальным решениям находятся из условия минимума квадратичного функционала.

Постановка задачи

Рассматривается защемленная по контуру прямоугольная пластина с размерами $a \times b$ в плане постоянной толщины h. Начало системы координат помещено в центр пластины. Вводятся относительные координаты срединной плоскости. Тогда размеры пластины будут следующими: $-\gamma/2 \le x \le \gamma/2$, $-1/2 \le y \le 1/2$, где $\gamma = a/b$.

Дифференциальное уравнение для определения форм собственных колебаний пластины имеет вид [22]:

$$\nabla^2\nabla^2 w(x,y) - \Omega^2 w(x,y) = 0, \tag{1}$$

где ∇^2 — двумерный оператор Лапласа; w — прогиб срединной поверхности пластины; $\Omega = pb^2\sqrt{\rho h / D}$ — относительная частота колебаний; p — круговая частота; ρ — плотность материала; $D = Eh^3 \Big/ \left[12(1-\nu^2)\right]$ — цилиндрическая жесткость; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона.

Граничные условия:

$$x = \pm\gamma/2: \quad w = 0, \quad w'_x = 0; \tag{2}$$

$$y = \pm 1/2: \quad w = 0, \quad w'_y = 0. \tag{3}$$

Требуется найти собственные частоты колебаний Ω_i, которые дают нетривиальные решения задачи (1) – (3) и соответствующие им формы колебаний.

Построение решения

Рассматривались четыре вида колебаний:

– симметричные относительно обеих осей ($S-S$ колебания);

– антисимметричные относительно обеих осей ($A-A$ колебания);

– антисимметрично-симметричные ($A-S$ колебания);

– симметрично-антисимметричные ($S-A$ колебания).

Выражения для функции прогибов выбирались, соответственно, в виде [23]:

$$w_{S-S}=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}}\left(A_k\operatorname{ch}\alpha_k x+B_k\operatorname{ch}\beta_k x\right)\cos\lambda_k y+\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}}\left(C_s\operatorname{ch}\xi_s y+D_s\operatorname{ch}\eta_s y\right)\cos\mu_s x; \tag{4}$$

$$\lambda_k=k\pi,\ \mu_s=s\pi/\gamma,\ \tilde{k}=(k+1)/2,\ \ \tilde{s}=(s+1)/2.$$

$$w_{A-A}=\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^{k}\left(A_k\operatorname{sh}\alpha_k x+B_k\operatorname{sh}\beta_k x\right)\sin\lambda_k y+\sum_{s=1}^{\infty}(-1)^{s}\left(C_s\operatorname{sh}\xi_s y+D_s\operatorname{sh}\eta_s y\right)\sin\mu_s x; \tag{5}$$

$$\lambda_k=2k\pi,\ \mu_s=2s\pi/\gamma,\ \ (k,s=1,\ 2,\ \ldots).$$

$$w_{A-S}=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}}\left(A_k\operatorname{sh}\alpha_k x+B_k\operatorname{sh}\beta_k x\right)\cos\lambda_k y+\sum_{s=1}^{\infty}(-1)^{s}\left(C_s\operatorname{ch}\xi_s y+D_s\operatorname{ch}\eta_s y\right)\sin\mu_s x; \tag{6}$$

$$\lambda_k=k\pi,\ \mu_s=2s\pi/\gamma,\ \ (s=1,\ 2,\ \ldots).$$

$$w_{S-A}=\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^{k}\left(A_k\operatorname{ch}\alpha_k x+B_k\operatorname{ch}\beta_k x\right)\sin\lambda_k y+\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}}\left(C_s\operatorname{sh}\xi_s y+D_s\operatorname{sh}\eta_s y\right)\cos\mu_s x; \tag{7}$$

$$\lambda_k=2k\pi,\ \mu_s=s\pi/\gamma,\ (k=1,\ 2,\ \ldots).$$

Здесь A_k, B_k, C_s, D_s — неопределенные коэффициенты (различные для каждого ряда): $\alpha_k=\sqrt{\lambda_k^2+\Omega}$; $\beta_k=\sqrt{\lambda_k^2-\Omega}$; $\xi_s=\sqrt{\mu_s^2+\Omega}$; $\eta_s=\sqrt{\mu_s^2-\Omega}$.

Ряды (4) – (7) удовлетворяют уравнению собственных колебаний (1) за счет коэффициентов (8). Потребуем, чтобы эти ряды удовлетворяли и всем граничным условиям (2), (3). Тогда используя разложения гиперболических функций в соответствующие ряды Фурье и переставляя затем знаки суммирования в двойных рядах, после преобразований получим бесконечную однородную систему линейных алгебраических уравнений относительно одной последовательности коэффициентов A_k («базовых» коэффициентов):

$$A_K^*=\frac{64\Omega^2\lambda_K^2}{\gamma p_K}\sum_{s=1}^{\infty}\frac{\mu_s^2}{\left[\left(\lambda_K^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2\right]q_s}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{A_k^*}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2}. \tag{8}$$

Для того чтобы избежать путаницы в индексах, в формуле (8) используются буквы k и K. Заметим, что выражение (8) содержит неизвестную частоту Ω.

Для решения $S-S$ принято: $k, s = 1, 3, \ldots$,

$$A_k^*=A_k\lambda_k\operatorname{ch}\tilde{\beta}_k,\ p_k=\alpha_k\operatorname{th}\tilde{\alpha}_k-\beta_k\operatorname{th}\tilde{\beta}_k,\ q_s=\xi_s\operatorname{th}\tilde{\xi}_s-\eta_s\operatorname{th}\tilde{\eta}_s; \tag{9}$$

для решения $A-A$ — $k, s = 1, 2, \ldots$,

$$A_k^*=A_k\lambda_k\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k,\ p_k=\alpha_k\operatorname{cth}\tilde{\alpha}_k-\beta_k\operatorname{cth}\tilde{\beta}_k,\ q_s=\xi_s\operatorname{cth}\tilde{\xi}_s-\eta_s\operatorname{cth}\tilde{\eta}_s; \tag{10}$$

для решения $A-S$ — $k=1,\ 3,\ \ldots;\ s=1,\ 2,\ \ldots$,

$$A_k^*=A_k\lambda_k\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k,\ p_k=\alpha_k\operatorname{cth}\tilde{\alpha}_k-\beta_k\operatorname{cth}\tilde{\beta}_k,\ q_s=\xi_s\operatorname{th}\tilde{\xi}_s-\eta_s\operatorname{th}\tilde{\eta}_s; \tag{11}$$

для решения $S-A$ — $k=1,\ 2,\ \ldots;\ s=1,\ 3,\ \ldots$,

$$A_k^*=A_k\lambda_k\operatorname{ch}\tilde{\beta}_k,\ p_k=\alpha_k\operatorname{th}\tilde{\alpha}_k-\beta_k\operatorname{th}\tilde{\beta}_k,\ q_s=\xi_s\operatorname{cth}\tilde{\xi}_s-\eta_s\operatorname{cth}\tilde{\eta}_s. \tag{12}$$

В свою очередь, в формулах (9) – (12) введены обозначения: $\tilde{\alpha}_k=\alpha_k\gamma/2$; $\tilde{\beta}_k=\beta_k\gamma/2$.

Коэффициенты B_k, C_s, D_s рядов (4) – (7) связаны с «базовым» коэффициентом A_k следующими зависимостями:

$$S-S: \quad B_k = -A_k \frac{\operatorname{ch}\tilde{\alpha}_k}{\operatorname{ch}\tilde{\beta}_k};\ D_s = -C_s \frac{\operatorname{ch}\tilde{\xi}_s}{\operatorname{ch}\tilde{\eta}_s};\ C_s = -\frac{8\Omega\mu_s}{\gamma q_s \operatorname{ch}\tilde{\xi}_s} \sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{\lambda_k \operatorname{ch}\tilde{\beta}_k}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2} A_k; \tag{13}$$

$$A-A: \quad B_k = -A_k \frac{\operatorname{sh}\tilde{\alpha}_k}{\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k};\ D_s = -C_s \frac{\operatorname{sh}\tilde{\xi}_s}{\operatorname{sh}\tilde{\eta}_s};\ C_s = -\frac{8\Omega\mu_s}{\gamma q_s \operatorname{sh}\tilde{\xi}_s} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_k \operatorname{sh}\tilde{\beta}_k}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2} A_k; \tag{14}$$

$$S-S: \quad B_k = -A_k \frac{\operatorname{sh}\tilde{\alpha}_k}{\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k};\ D_s = -C_s \frac{\operatorname{ch}\tilde{\xi}_s}{\operatorname{ch}\tilde{\eta}_s};\ C_s = -\frac{8\Omega\mu_s}{\gamma q_s \operatorname{ch}\tilde{\xi}_s} \sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{\lambda_k \operatorname{sh}\tilde{\beta}_k}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2} A_k; \tag{15}$$

$$S-A: \quad B_k = -A_k \frac{\operatorname{ch}\tilde{\alpha}_k}{\operatorname{ch}\tilde{\beta}_k};\ D_s = -C_s \frac{\operatorname{sh}\tilde{\xi}_s}{\operatorname{sh}\tilde{\eta}_s};\ C_s = -\frac{8\Omega\mu_s}{\gamma q_s \operatorname{sh}\tilde{\xi}_s} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_k \operatorname{ch}\tilde{\beta}_k}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega^2} A_k. \tag{16}$$

Для определения собственных частот и форм колебаний определитель системы (8) должен быть равен нулю, что приведет к трансцендентному уравнению, из которого находится бесконечная последовательность собственных частот Ω_i. Каждой частоте будет соответствовать своя форма колебаний (4) – (7).

Получение частотного трансцендентного уравнения в развернутом виде и его решение является сложной математической задачей. Избежать этих трудностей можно, если рассматривать систему (8) как готовый алгоритм её решения *методом последовательных приближений*. Коэффициенты A_k^* в правой части системы (8) считаются предыдущей итерацией A_{kN}^*, а коэффициенты в левой части — последующей итерацией $A_{k(N+1)}^*$. Далее подбираются значения частоты Ω_j, при которых метод последовательных приближений, организованный по формуле (8), приводит, начиная с некоторой итерации, к равенствам $A_{k(N+1)}^* = A_{kN}^* \neq 0$. В качестве начального приближения можно принять все $A_{k0}^* = 1$. Найденные таким образом частоты и будут искомыми частотами свободных колебаний, а найденные коэффициенты $A_{k(N+1)}^*$ (с точностью до постоянного множителя) дадут соответствующую форму колебаний. Следует заметить, что поиск простым перебором Ω с изменяющимся шагом и проверка собственных значений не занимает много времени ввиду простоты вычислений по формуле (8).

С учетом формул (13) – (16) выражения для форм колебаний (4) – (7) можно записать для одной последовательности коэффициентов A^*_{ik} (i — номер собственной частоты):

$$\begin{aligned} w_{i,S-S} = &\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{(-1)^{\tilde{k}} A_{ik}^*}{\lambda_k} \left(\frac{\operatorname{ch}\alpha_k x}{\operatorname{ch}\tilde{\alpha}_k} - \frac{\operatorname{ch}\beta_k x}{\operatorname{ch}\tilde{\beta}_k} \right) \times \\ &\times \cos\lambda_k y - \frac{8\Omega_i}{\gamma} \sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{(-1)^{\tilde{s}} \mu_s}{q_s} \left(\frac{\operatorname{ch}\xi_s y}{\operatorname{ch}\tilde{\xi}_s} - \frac{\operatorname{ch}\eta_s y}{\operatorname{ch}\tilde{\eta}_s} \right) \left(\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{A_{ik}^*}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega_i^2} \right) \cos\mu_s x; \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} w_{i,A-A} = &\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k A_{ik}^*}{\lambda_k} \left(\frac{\operatorname{sh}\alpha_k x}{\operatorname{sh}\tilde{\alpha}_k} - \frac{\operatorname{sh}\beta_k x}{\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k} \right) \times \\ &\times \sin\lambda_k y - \frac{8\Omega_i}{\gamma} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s \mu_s}{q_s} \left(\frac{\operatorname{sh}\xi_s y}{\operatorname{sh}\tilde{\xi}_s} - \frac{\operatorname{sh}\eta_s y}{\operatorname{sh}\tilde{\eta}_s} \right) \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{ik}^*}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega_i^2} \right) \sin\mu_s x; \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} w_{i,A-S} = &\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k A_{ik}^*}{\lambda_k} \left(\frac{\operatorname{sh}\alpha_k x}{\operatorname{sh}\tilde{\alpha}_k} - \frac{\operatorname{sh}\beta_k x}{\operatorname{sh}\tilde{\beta}_k} \right) \times \\ &\times \cos\lambda_k y - \frac{8\Omega_i}{\gamma} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s \mu_s}{q_s} \left(\frac{\operatorname{ch}\xi_s y}{\operatorname{ch}\tilde{\xi}_s} - \frac{\operatorname{ch}\eta_s y}{\operatorname{ch}\tilde{\eta}_s} \right) \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{ik}^*}{\left(\lambda_k^2+\mu_s^2\right)^2-\Omega_i^2} \right) \sin\mu_s x; \end{aligned} \tag{19}$$

$$w_{i,S-A} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k A_{ik}^*}{\lambda_k} \left(\frac{\operatorname{ch} \alpha_k x}{\operatorname{ch} \tilde{\alpha}_k} - \frac{\operatorname{ch} \beta_k x}{\operatorname{ch} \tilde{\beta}_k} \right) \times$$

$$\times \sin \lambda_k y - \frac{8\Omega_i}{\gamma} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s \mu_s}{q_s} \left(\frac{\operatorname{sh} \xi_s y}{\operatorname{sh} \tilde{\xi}_s} - \frac{\operatorname{sh} \eta_s y}{\operatorname{sh} \tilde{\eta}_s} \right) \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{ik}^*}{\left(\lambda_k^2 + \mu_s^2 \right)^2 - \Omega_i^2} \right) \cos \mu_s x. \quad (20)$$

Численные результаты

Для численной реализации предложенного метода была составлена программа в системе аналитических вычислений Maple. Все коэффициенты A_{k0}^* начального приближения принимались равными единице. Число приближений (итераций) — от 12 до 25. Число членов в рядах в окончательных расчетах принималось равным 49. Дальнейшее увеличение количества слагаемых в рядах и числа итераций практически не увеличивало точность вычислений (до шести значащих цифр). В качестве примера вычислялись собственные частоты квадратной пластины, а также прямоугольной пластины с отношением сторон 2 : 1. Они представлены в первой строке табл. 1 и 2. Были получены также трехмерные изображения соответствующих форм колебаний (здесь не приводятся).

Обсуждение результатов и их сравнение

В табл. 1 и 2 для сравнения в хронологическом порядке приведены результаты других авторов [1] – [21] (заметим, что для пластины с отношением сторон $\gamma = 2$ численных результатов известно гораздо меньше, чем для квадратной). Численные результаты, заимствованные из работ [1] – [3], [13], умножались на π^2, чтобы привести их к формуле для относительной частоты, используемой в настоящей работе. Для пересчета частотных коэффициентов, приведенных в работе [11], из них извлекался квадратный корень и результат умножался на π^2.

Таблица 1

Относительные частоты $\Omega = pb^2 \sqrt{\rho h / D}$ собственных колебаний квадратной пластины (СССС) для $\nu = 0{,}3$

Результаты, полученные в работе	Ω_1 *S–S*	Ω_2 *A–S*	Ω_3 *A–A*	Ω_4	Ω_5 *S–S*	Ω_6 *A–S*	Ω_7 *A–S*	Ω_8 *S–S*	Ω_9 *A–A*
	35,985	73,394	108,216	–	132,208	164,998	210,522	220,032	243,157
Результаты других авторов									
Sezawa [1]	37,455	74,841	108,121	–	134,226	–	–	–	–
Tomatika [2]	35,728	75,009	107,780	–	130,770	160,380	–	–	239,340
Iguchi [3]	35,984	73,400	108,220	–	132,183	164,990	–	–	243,098
Young [4]	35,990	73,410	108,270	131,64	132,250	165,150	–	–	–
Odman [12]	35,999	73,405	108,237	–	131,900	165,023	210,526	220,060	242,660
Болотин [14]	35,096	72,897	107,470	–	131,630	164,388	210,351	219,322	242,200
Филиппов [5]	35,965	73,390	108,071	–	130,770	164,980	210,191	220,130	243,080
Вайнберг [13]	35,985	73,400	108,220	–	132,184	164,990	–	–	243,098
Leissa [6]	35,992	73,413	108,270	131,64	132,240	–	–	–	–
Dickinson [7]	35,988	73,406	108,250	131,62	132,230	–	–	–	–
Bhat [8]	35,985	73,395	108,218	131,78	132,410	–	–	–	–
Liew [9]	35,990	73,410	108,260	131,66	–	–	–	–	–
Bardell [15]	35,990	73,390	108,220	–	–	–	–	–	–
Ng [17]	35,989	73,407	108,249	131,62	132,244	165,074	–	–	–
Shu [19]	35,985	73,394	108,210	131,58	132,200	165,000	–	–	–
Reutsky [21]	35,983	73,387	108,202	131,58	132,228	165,030	210,519	219,932	242,155
Kerboua [16]	35,450	72,030	103,700	129,41	130,280	–	–	–	–
Нестеров [11]	36,053	73,439	108,535	–	131,910	165,135	210,530	220.475	242,717
Wang [18]	35,986	73,399	108,230	131,57	132,220	–	–	–	–
Saini [20]	35,985	73,394	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. СССС — защемленная с четырех сторон пластина.

Анализ результатов табл. 1 показывает, что частота Ω_4 была найдена не всеми авторами, которые занимались поиском обертонов более высокого порядка. В частности, она «пропущена» не только в настоящей работе, но и в работах [1] – [3], [5], [11] – [14]. Проверка значений частот Ω_4 и близких к ним, найденных другими авторами, не дала подтверждения, что это какой-либо обертон свободных колебаний. Близость частот Ω_4 и Ω_5 свидетельствует о том, что это, скорее всего, одна и та же частота, вычисленная рядом авторов с погрешностью при замене x на y в расчетных формулах.

К результатам, полученным в настоящей работе для квадратной пластины, наиболее близки результаты S. Iguchi [3] и, возможно, Д. В. Вайнберга [13], хотя у них помимо частоты Ω_4, не найдены частоты Ω_7 и Ω_8, а также А. П. Филиппова [5] (за исключением частоты Ω_5) и S. Yu. Reutskiy [21], за исключением частоты Ω_9, т. е. те результаты, которые были получены при более строгом выполнении граничных условий задачи. Следует отметить, что главная (первая) частота совпадает у многих авторов: [3], [7], [8], [13], [18] – [21], по остальным частотам наблюдается заметное расхождение.

Таблица 2

Относительные частоты $\Omega = pb^2\sqrt{\rho h / D}$ собственных колебаний прямоугольной пластины (СССС, $\gamma = 2$, $\nu = 0{,}3$)

Результаты, полученные в работе	Ω_1 *S–S*	Ω_2 *S–A*	Ω_3 *S–S*	Ω_4 *S–A*	Ω_5 *A–S*	Ω_6 *A–A*	Ω_7 *A–S*	Ω_8 *S–S*	Ω_9 *A–A*
	24,578	31,826	44,770	63,331	63,983	71,076	83,273	87,253	100,792
Результаты других авторов									
Болотин [14]	24,092	31,395	44,354	62,998	63,925	70,903	82,905	–	100,176
Bhat [10]	24,578	31.827	44,808	63,570	63,985	71,079	–	–	–

Первые шесть частот, полученные в настоящей работе для $\gamma = 2$, практически совпадают с результатами R. B. Bhat [10] (специальные ортогональные полиномы в методе Ритца).

Выводы

1. Предложенный метод отыскания собственных частот отличается простым алгоритмом, быстротой и высокой точностью вычислений. Это подтверждает сравнительный анализ результатов, полученных в настоящей работе и в работах других авторов.

2. Данный метод может использоваться и для прямоугольных пластин с другими видами граничных условий (консольная пластина, пластина с тремя защемленными и одной свободной краями и др.), а также для динамических расчетов по сдвиговым теориям (пластины типа Тимошенко).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sezawa K.* On the lateral vibration of a rectangular plate clamped at four edges / K. Sezawa // Report of the Aeronautical Research Institute of Tokyo University. — 1931. — Vol. 6. — № 70. — Pp. 61–70.

2. *Tomotika S.* LX. The transverse vibration of a square plate clamped at four edges / S. Tomatika // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: Series 7. — 1936. — Vol. 21. — Is. 142. — Pp. 745–760. DOI:10.1080/14786443608561622.

3. *Iguchi S.* Die Biegungsschwingungen der vierseitig eingespannten rechteckigen Platte / S. Iguchi // Ingenieur-Archiv. — 1937. — Vol. 8. — Is. 1. — Pp. 11–25. DOI: 10.1007/BF02086517.

4. *Young D.* Vibration of rectangular plates by the Ritz method / D. Young // Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME. — 1950. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. 448–453.

5. *Филиппов А. П.* Колебания деформируемых систем / А. П. Филиппов. — М.: Машиностроение, 1970. — 734 с.

6. *Leissa A. W.* The free vibration of rectangular plates / A. W. Leissa // Journal of Sound and Vibration. —1973. — Vol. 31. — Is. 3. — Pp. 257–293. DOI: 10.1016/S0022-460X(73)80371-2.

7. *Dickinson S. M.* On the use of simply supported plate functions in the Rayleigh-Ritz method applied to the flexural vibration of rectangular plates / S. M. Dickinson, E. K. H Li // Journal of Sound and Vibration. —1982. — Vol. 80. — Is. 2. — Pp. 292–297. DOI:10.1016/0022-460X(82)90199-7.

8. *Bhat R. B.* Natural frequencies of rectangular plates using characteristic orthogonal polynomials in Rayleigh-Ritz method / R. B. Bhat // Journal of Sound and Vibration. — 1985. — Vol. 102. — Is. 4. — Pp. 493–499. DOI:10.1016/S0022-460X(85)80109-7.

9. *Liew K. M.* Free vibration analysis of rectangular plate using orthogonal plate function / K. M. Liew, K. Y. Lam, S. T. Chow // Computers and Structures. — 1990. — Vol. 34. — Is. 1. — Pp. 79–85. DOI: 10.1016/0045-7949(90)90302-I.

10. *Bhat R. B.* Numerical experiments on the determination of natural frequencies of transverse vibrations of rectangular plates of non-uniform thickness / R. B. Bhat, P. A. A Laura, R. G. Gutierrez, V. H. Cortinez, H. C. Sanzi // Journal of Sound and Vibration. — 1990. — Vol. 138. — Is. 2. — Pp. 205–219. DOI: 10.1016/0022-460X(90)90538-B.

11. *Нестеров С. В.* Изгибные колебания квадратной пластины, защемленной по контуру / С. В. Нестеров // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2011. — № 6. — С. 159–165.

12. *Odman S. T. A.* Studies of boundary value problems. Part II. Characteristic functions of rectangular plates / S. T. A. Odman // Proc. NR 24. — Swedish Cement and Concrete Research Institute of Technology, 1955. — P. 7.

13. *Вайнберг Д. В.* Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин / Д. В. Вайнберг. — Киев: Изд-во «Будівельник», 1973. — 488 с.

14. *Болотин В. В.* Динамический краевой эффект при упругих колебаниях пластинок / В. В. Болотин // Известия АН СССР. Инженерный сборник. — 1961. — Т. 31. — С. 3–14.

15. *Bardell N. S.* Free vibration analysis of a flat plate using the hierarchical finite element method / N. S. Bardell // Journal of Sound and Vibration. — 1991. — Vol. 151. — Is. 2. — Pp. 263–289. DOI:10.1016/0022-460X(91)90855-E.

16. *Kerboua Y.* Hybrid method for vibration analysis of rectangular plates / Y. Kerboua, A. A. Lakis, M. Thomas, L. Marcouiller // Nuclear Engineering and Desing. — 2007. — Vol. 237. — Is. 8. — Pp. 791–801. DOI:10.1016/j.nucengdes.2006.09.025.

17. *Ng C. H. W.* Comparison of discrete singular convolution and generalized differential quadrature for the vibration analysis of rectangular plates / C. H. W. Ng, Y. B. Zhao, G. W. Wei // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2004. — Vol. 193. — Is. 23–26. — Pp. 2483–2506. DOI: 10.1016/j.cma.2004.01.013.

18. *Wang X.* Free vibration analysis of beams and rectangular plates with free edges by the discrete singular convolution / X. Wang, S. Xu // Journal of Sound and Vibration. — 2010. — Vol. 329. — Is. 10. — Pp. 1780–1792. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.12.006.

19. *Shu C.* Implementation of clamped and simply supported boundary conditions in the GDQ free vibration analysis of beams and plates / C. Shu, H. Du // International Journal of Solids and Structures. — 1997. — Vol. 34. — Is. 7. — Pp. 819–835. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00057-1.

20. *Saini R.* Transverse Vibration of Non-Homogeneous Rectangular Plates of Variable Thickness Using GDQ / R. Saini, R. Lal // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering. — 2014. — Vol. 8. — No. 9. — Pp. 1197–1202.

21. *Reutskiy S. Yu.* The Method of fundamental solutions for problems of free vibrations of plates / S. Yu. Reutskiy // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2007. — Vol. 31. — Is. 1. — Pp. 10–21. DOI: 10.1016/j.enganabound.2006.06.004.

22. *Лехницкий С. Г.* Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. — М.-Л.: ОГИЗ – ГИТТЛ, 1947. — 355 с.

23. *Барышников С. О.* Вычисление частот и форм собственных колебаний панелей обшивки судна // Журнал Университета водных коммуникаций / С. О. Барышников, М. В. Сухотерин. — 2012. — № 3. — С. 94а–103.

NATURAL VIBRATIONS OF THIN RECTANGULAR ELEMENTS OF SHIP STRUCTURES

This article provides a solution to the problem of natural vibrations of clamped along the contour of a rectangular plate, Kirchhoff using two hyperbola-trigonometric series in two coordinates, satisfying the basic

differential equation of the problem. If all the boundary conditions obtained infinite system of linear algebraic equations for the four sequences of unknown coefficients of the series which is reduced to an infinite system with respect to one sequence of coefficients, containing as a parameter the frequency of the oscillations. Brute force this setting, the changing step are frequency, giving a non-trivial solution of the infinite system, i.e. the natural frequencies.

The resulting spectrum of natural frequencies compared to frequencies found by other authors. The accuracy of calculations and the effectiveness of approximate methods are analyzes. It is shown that the natural frequencies found in the present work the proposed method are very accurate when you hold in the ranks of the 49 members. It is established that a further increase in the number of members in the ranks does not affect the precision of calculation of eigenfrequencies.

Keywords: natural oscillations, rectangular plate clamped, Fourier series, numerical results.

REFERENCES

1. Sezawa, Katsutada. "On the Lateral Vibration of a Rectangular Plate Clamped at four Edges." *Report of the Aeronautical Research Institute of Tokyo University* 6.70 (1931): 61–70.

2. Tomotika, S. "LX. The transverse vibration of a square plate clamped at four edges." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: Series 7* 21.142 (1936): 745–760. DOI: 10.1080/14786443608561622.

3. Iguchi, S. "Die Biegungsschwingungen der vierseitig eingespannten rechteckigen Platte." *Ingenieur-Archiv* 8.1 (1937): 11–25. DOI: 10.1007/BF02086517.

4. Young, Dana. "Vibration of rectangular plates by the Ritz method." *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME* 17.4 (1950): 448–453.

5. Filippov, A. P. *Kolebanija deformiruemyh sistem*. M.: Izd-vo "Mashinostroenie", 1970.

6. Leissa, Arthur W. "The free vibration of rectangular plates." *Journal of Sound and Vibration* 31.3 (1973): 257–293. DOI: 10.1016/S0022-460X(73)80371-2.

7. Dickinson, S. M., and E. K. H Li. "On the use of simply supported plate functions in the Rayleigh-Ritz method applied to the flexural vibration of rectangular plates." *Journal of Sound and Vibration* 80.2 (1982): 292–297. DOI:10.1016/0022-460X(82)90199-7.

8. Bhat, R. B. "Natural frequencies of rectangular plates using characteristic orthogonal polynomials in Rayleigh-Ritz method." *Journal of Sound and Vibration* 102.4 (1985): 493–499.

9. Liew, K. M., K. Y. Lam, and S. T. Chow. "Free vibration analysis of rectangular plates using orthogonal plate function." *Computers & Structures* 34.1 (1990): 79–85. DOI: 10.1016/0045-7949(90)90302-I.

10. Bhat, R. B., P. A. A Laura, R. G. Gutierrez, V. H. Cortinez, and H. C. Sanzi. "Numerical experiments on the determination of natural frequencies of transverse vibrations of rectangular plates of non-uniform thickness." *Journal of Sound and Vibration* 138.2 (1990): 205–219. DOI: 10.1016/0022-460X(90)90538-B.

11. Nesterov, S. V. "Flexural vibration of a square plate clamped along its contour." *Mechanics of Solids* 46.6 (2011): 946–951.

12. Odman, S. T. A. "Studies of boundary value problems. Part II. Characteristic functions of rectangular plates." *Proc. NR 24*. Swedish Cement and Concrete Research Institute of Technology, 1955:7.

13. Vajnberg, D. V. *Spravochnik po prochnosti, ustojchivosti i kolebanijam plastin*. Kiev: Izd-vo «Budivel'nik», 1973.

14. Bolotin, V. V. "Dinamicheskij kraevoj jeffekt pri uprugih kolebanijah plastinok." *Izvestija AN SSSR. Inzhenernyj sbornik* 31 (1961): 3–14.

15. Bardell, N. S. "Free vibration analysis of a flat plate using the hierarchical finite element method." *Journal of sound and vibration* 151.2 (1991): 263–289. DOI:10.1016/0022-460X(91)90855-E.

16. Kerboua, Y., A. A. Lakis, M. Thomas, and L. Marcouiller. "Hybrid method for vibration analysis of rectangular plates." *Nuclear Engineering and Desing* 237.8 (2007): 791–801. DOI:10.1016/j.nucengdes.2006.09.025.

17. Ng, C. H. W., Y. B. Zhao, and G. W. Wei. "Comparison of discrete singular convolution and generalized differential quadrature for the vibration analysis of rectangular plates." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 193.23 (2004): 2483–2506. DOI: 10.1016/j.cma.2004.01.013.

18. Wang, Xinwei, and Suming Xu. "Free vibration analysis of beams and rectangular plates with free edges by the discrete singular convolution." *Journal of Sound and Vibration* 329.10 (2010): 1780–1792. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.12.006.

19. Shu, C., and H. Du. “Implementation of clamped and simply supported boundary conditions in the GDQ free vibration analysis of beams and plates.” *International Journal of Solids and Structures* 34.7 (1997): 819–835. DOI: 10.1016/S0020-7683(96)00057-1.

20. Saini, R., and R. Lal. “Transverse Vibration of Non-Homogeneous Rectangular Plates of Variable Thickness Using GDQ.” *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering* 8.9 (2014): 1197–1202.

21. Reutskiy, S. Yu. “The method of fundamental solutions for problems of free vibrations of plates.” *Engineering Analysis with Boundary Elements* 31.1 (2007): 10–21. DOI: 10.1016/j.enganabound.2006.06.004

22. Lehnickij, S. G. *Anizotropnye plastinki*. M.–L.: OGIZ-GITTL, 1947.

23. Baryshnikov, S. O., and M. V. Suhoterin. “Computation of frequency and forms of free oscillations of panels of a ship shell.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3 (2012): 94a–103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Сухотерин Михаил Васильевич — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *kaf _math@gumrf.ru*	*Sukhoterin Mikhail Vasil’evich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *kaf _math@gumrf.ru*
Барышников Сергей Олегович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *rector@gumrf.ru*	*Baryshnikov Sergej Olegovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *rector@gumrf.ru*
Аксенов Дмитрий Андреевич — аспирант. Научный руководитель: *Сухотерин Михаил Васильевич*. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *kaf _math@gumrf.ru*	*Aksenov Dmitrij Andreevich* — postgraduate. Supervisor: *Sukhoterin Mikhail Vasil’evich*. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *kaf _math@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 9 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-113-121
УДК 629.122

Е. В. Купальцева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАССАЖИРОВМЕСТИМОСТИ «МАЛОГО» ПАССАЖИРСКОГО СУДНА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассмотрено два метода определения пассажировместимости «малых» пассажирских судов. Первый метод основан на решении уравнения, где искомой является величина минимально возможной площади пассажирской палубы судна, необходимой для размещения заданного числа пассажиров. Входящие в данное уравнение неизвестные определены на основе статистического анализа. Уровень комфортабельности задается принимаемой удельной полезной площадью, предназначенной для размещения одного пассажира. Второй метод основан на определении необходимых размеров судна в зависимости от заданной пассажировместимости. Длина судна в этом случае представлена в виде суммы длин отсеков, находящихся в корпусе. При расчете ширины судна учитывается рядность, габариты магистрального коридора, зашивка переборок и стенок судна. Проведена проверка адекватности предложенных методов, результаты которой позволяют судить о достоверности полученных данных.

Ключевые слова: пассажирское судно, уравнение пассажировместимости, размерения судна, уровень комфортабельности, компоновка судна.

Введение

Постановка задачи обоснования главных элементов пассажирского судна определяет, что выбранные размерения удовлетворяют, среди прочего, требованию условия пассажировместимости. Экономическая эффективность пассажирского судна в задаче оптимизации подразумевает соблюдение баланса между обеспечением вместимости судна и необходимым уровнем комфортабельности. Уровень последней в значительной степени зависит от назначения судна, времени пребывания людей и площадей, предоставляемых для размещения пассажиров. В условиях жесткой конкуренции между различными видами транспорта комфортабельность, а следовательно, и пассажировместимость являются весьма важными показателями. Отмеченное в не меньшей степени относится к «малым» пассажирским судам, обслуживающим внутригородские и пригородные линии.

Вопросы пассажировместимости решаются прежде всего на ранней стадии проектирования при выборе главных размерений. Они должны обеспечить на судне возможность расположения необходимых по площади помещений, предусмотренных для размещения пассажиров, количество которых определяется техническим заданием. Комплексный подход к решению поставленной задачи позволяет определить компоновку будущего судна, архитектурно-конструктивный тип (АКТ), количество и назначение палуб, номенклатуру и размещение необходимых помещений, учитывая при этом требования контролирующих организаций к уровню комфортабельности и безопасности. Также решение данной задачи на этапе предэскизного проектирования позволяет убедиться в верности определенных ранее главных размерений судна.

Существует два основных метода оценки пассажировместимости судна на начальном этапе проектирования. Один из них основан на решении уравнения пассажировместимости, другой предполагает расчет длины и ширины судна в зависимости от размеров размещаемых на судне отсеков и помещений. В первом случае определяющим фактором является полезная площадь, определяемая для каждого пассажира и члена экипажа, во втором основой являются длина и ширина необходимых к размещению помещений с учетом минимально допустимых проходов и посадочных площадок. Колеблемость переменных величин определяется статистически для судов рассматриваемого типа.

Современные исследования, посвященные вопросам пассажировместимости, отражают методы и способы определения уровня комфортабельности [1], влияние заданного количества пассажиров на характеристики судна в задаче оптимизационного проектирования [2] – [4]. Немаловажным в данном случае является решение вопроса коммерческой эффективности [5]. Однако в этих работах отсутствуют основные удельные показатели, необходимые для определения вместимости «малого» пассажирского судна.

Основная часть

В работе [6] «малые» пассажирские суда для внутригородских и пригородных линий были разделены по АКТ на три группы. Согласно этому разделению, на судах АКТ I пассажиры размещаются в трюме и в надстройке на главной палубе. На судах АКТ II на палубе трюма в полуутопленной надстройке и на тентовой палубе суда АКТ III являются подвидом АКТ II типа с расположением пассажиров только на палубе трюма.

Согласно данным источников [3] и [7], уравнение пассажировместимости имеет вид

$$LB \geq \frac{fn + f_{эк} n_{эк}}{\sum_i (1 - k_i)\ \alpha_i\ l_i\ b_i}, \qquad (1)$$

где $l_i = \frac{L_i}{L}$, $b_i = \frac{B_i}{B}$ — относительные размеры i-й палубы; f — удельная полезная площадь, предназначенная для размещения одного пассажира; n — число пассажиров, предусмотренное для размещения; $f_{эк}$ — площадь, предусмотренная для размещения одного члена экипажа; $n_{эк}$ — количество членов экипажа; k_{ij} — коэффициент, характеризующий долю служебной площади в общей

площади *i*-й палубы; α_i — коэффициент полноты *i*-й палубы (*i* = 1 — для палубы трюма; *i* = 2 — для главной палубы; *i* = 3 — для тентовой палубы; *j* = 1 — АКТ I; *j* = 2 — АКТ II; *j*= 3 — АКТ III).

Одним из основных показателей комфортабельности является величина удельной полезной площади, предусмотренной для размещения одного пассажира [3]. В зависимости от типа палубы удельная полезная площадь для палубы трюма составляет 0,53 … 0,69 м^2/чел., для палубы надстройки и тентовой палубы — 0,51 … 0,9 м^2/чел. Входящие в уравнение (1) величины для «малых» пассажирских речных судов можно определить на основе статистического анализа [8]. Доля служебной площади *i*-й палубы выражена коэффициентом k_{ij}. К служебным помещениям относятся машинное помещение, шкиперские, дежурные помещения, кладовые и др. Величина коэффициента k_{ij} для судов рассматриваемого типа может быть определена по графикам рис. 1.

Проанализировав номенклатуру и распределение по палубам служебных помещений, можно отметить следующие особенности каждого из рассматриваемых типов АКТ. Суда АКТ I имеют наибольшую продолжительность рейса. На борту, как правило, располагается кафе или буфет. Каюты экипажа оборудуются спальными местами, а также предусматривается зона подогрева пищи и дополнительные кладовые. Рассматриваемые помещения обычно располагают на палубе трюма, максимально используя главную палубу для размещения пассажиров, что приводит к росту значений k_{11} (палуба трюма) и уменьшению k_{21} (главная палуба). На рис. 1 показан вышеописанный подход к размещению служебных помещений для судов АКТ I. Суда АКТ II и III имеют более короткие маршруты и небольшую численность экипажа. В качестве служебных предусмотрены небольшие дежурные помещения с рабочим столом и диваном, а также небольшие кладовые для размещения инвентаря.

В зависимости от мощности силовой установки, количества и типа главных двигателей на рассматриваемых судах машинные помещения могут быть двух типов: *обслуживаемые* (полноценное помещение с выгородками до тентовой палубы) и *необслуживаемые* — машинное помещение, которое не предполагает вахтового метода обслуживания (располагается под главной палубой). С увеличением главных размерений рассматриваемых судов номенклатура и тип служебных помещений остаются неизменными.

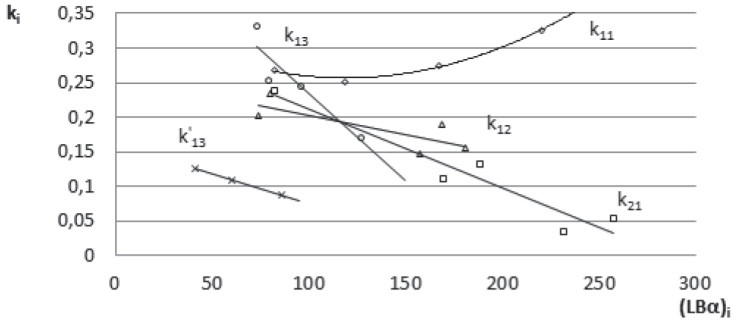


Рис. 1. Коэффициенты, учитывающие долю площади служебных помещений (k'_{13} — для судов АКТ III с необслуживаемым машинным помещением)

Статистические зависимости относительных величин l_i и b_i приведены на рис. 2 и 3.

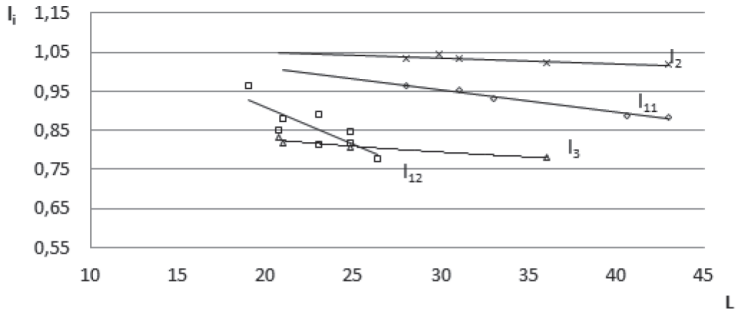


Рис. 2. Относительная длина *i*-й палубы

Как видно из зависимостей рис. 2, для относительной длины главной палубы значения $l_i > 1$, что объясняется особенностью носовых и кормовых обводов. Для остальных типов палуб данные значения располагаются в диапазоне 0,78 … 0,95. Уменьшение величины l_i связано со снижением влияния судовых обводов при увеличении длины судна.

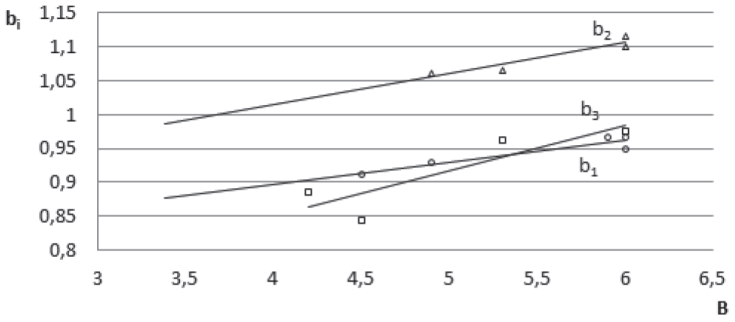


Рис. 3. Относительная ширина *i*-й палубы

Аналогично значениям относительной длины, значения относительной ширины для главной палубы имеют значения больше единицы (рис. 3). Ширина палубы трюма и тентовой палубы меньше, чем ширина по КВЛ (конструктивную ватерлинию), что также объясняется особенностью судовых обводов. Рост величины b_i с увеличением ширины судна обусловлен тем, что при большей пассажировместимости составляющие, такие как магистральные проходы, посадочные площадки и др. устанавливаются более широкими.

Площадь, необходимая для размещения экипажа, определяется в зависимости от объема и назначения помещений, требующих обслуживания, таких как машинное помещение, буфет, кафе и др. [9]. На графике рис. 4 приведена зависимость удельной площади $k_{эк}$, приходящейся на каждого члена экипажа в зависимости от их количества. При анализе данной величины необходимо исходить из того, что на судах АКТ I в каютах для экипажа предусмотрены койки, а на судах АКТ II и III в служебных помещениях предусмотрены лишь места для сидения.

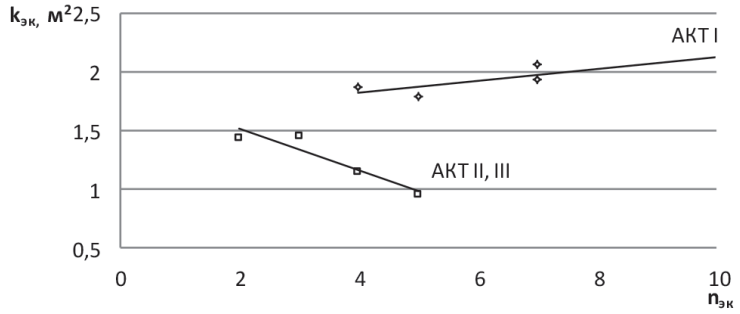


Рис. 4. Удельная площадь для размещения экипажа

Коэффициент полноты площади рассматриваемой палубы можно определить введя поправку к коэффициенту полноты конструктивной ватерлинии — α. Величина поправки для главной палубы и палубы трюма колеблется в пределах 1,01 … 1,18. Верхние значения соответствуют судам с относительно малыми значениями коэффициента α = 0,74 ... 0,77, нижние значения поправочного коэффициента принимаются для судов с более полными обводами — α = 0,79 ... 0,95. Зависимость $k_{\alpha_i} = f(\alpha)$ определяется следующими выражениями:

при $\alpha \le 0{,}77$ $\quad k_{\alpha_{1,2}} = 1{,}48\alpha - 0{,}98;$ (2)

при $\alpha > 0{,}77$ $\quad k_{\alpha_{1,2}} = 1{,}28 - 0{,}26\alpha;$ (3)

$$k_{\alpha_3} = 1{,}96 - 1{,}03\alpha. \quad (4)$$

В аналитическом виде графические зависимости рис. 1 – 4 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Выражения неизвестных уравнения (1)

Тип судна	Выражение	Коэффициент корреляции R^2
АКТ I	$k_{11} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot (LB\alpha)^2_{11} - 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot (LB\alpha)_{11} + 0{,}355$	0,996
	$k_2 = 0{,}325 - 1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot (LB\alpha)_2$	0,91
	$l_{11} = 1{,}12 - 5{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,979
	$l_2 = 1{,}08 - 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,756
	$b_1 = 0{,}033B + 0{,}767$	0,903
	$b_2 = 0{,}046B + 0{,}829$	0,887
	$k_1^{эк} = 0{,}051n_{эк} + 1{,}63$	0,808
АКТ II, III	$k_{12} = 0{,}259 - 0{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot (LB\alpha)_{12}$	0,64
	$k_{13} = 0{,}484 - 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot (LB\alpha)_{13}$	0,847
	$k'_{13} = 0{,}162 - 0{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot (LB\alpha)'_{13}$	0,99
	$l_{12,13} = 1{,}3 - 19{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot L$	0,77
	$l_2 = 1{,}12L^{-0{,}102}$	0,95
	$b_1 = 0{,}033B + 0{,}767$	0,903
	$b_2 = 0{,}067B + 0{,}58$	0,765
	$k_2^{эк} = 1{,}88 - 0{,}179n_{эк}$	0,882

Таким образом, по приведенным в таблице зависимостям можно определить минимально допустимую величину произведения LB, т. е. площадь палубы, необходимую для размещения заданного количества пассажиров. Более точно вопрос пассажировместимости судна может быть решен путем нахождения размерений судна, необходимых для размещения заданного числа пассажиров. Так, длина судна может быть представлена в виде суммы длин отсеков корпуса, величина которых прямо или косвенно связана с пассажировместимостью:

$$L = L_ф + L_{МП} + L_а + L_с + L_{вс}, \quad (5)$$

где $L_ф$ — длина форпика; $L_{МП}$ — длина машинного помещения; $L_а$ — длина ахтерпика; $L_с$ — длина пассажирского салона; $L_{вс}$ — суммарная длина вспомогательных помещений (служебных помещений, буфетов, санузлов, вспомогательных отсеков, рубок и др.).

Определение составляющих уравнения (5) необходимо давать с учетом требований, установленных не только техническим заданием, но и Правилами Российского речного регистра и Санитарными правилами.

Длина форпика принимается в соответствии с требованием [10]:

$$L_ф \geq B / 2, \quad (6)$$

где B — расчетная ширина судна.

При этом длина форпика должна быть кратна шпации, принимаемой для данного отсека. Длину машинного помещения можно определить по предлагаемой на рис. 5 графической зависимости.

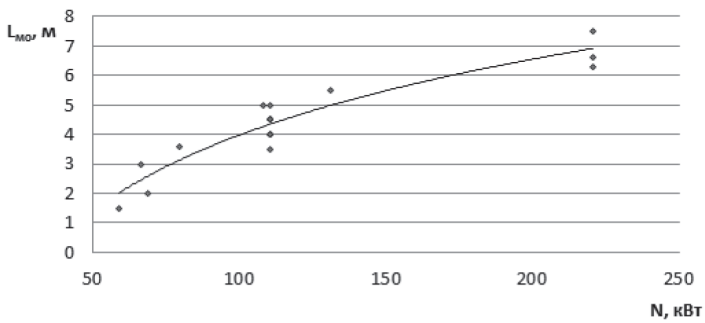


Рис. 5. Зависимость длины машинного отделения от мощности силовой установки

Длина ахтерпика во многом определяется условиями размещения в нем рулевой машины. Её мощность, и, следовательно, размеры зависят от характеристики управляемости, взаимосвязь которой на начальной стадии проектирования с главными размерениями судна и его скоростью хода можно описать произведением $LT\upsilon$ [11]. График зависимости длины ахтерпика представлен на рис. 6. Большие значения длины ахтерпика соответствуют судам с двухвальной силовой установкой.

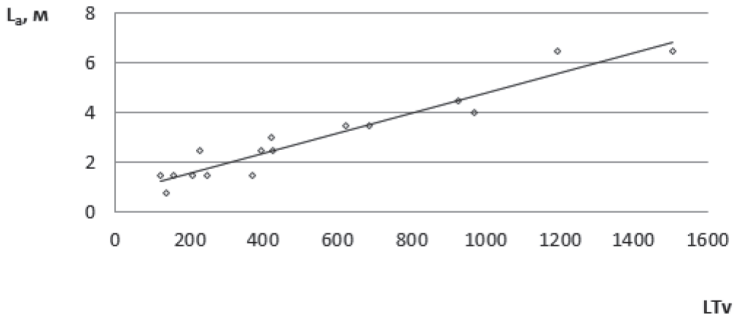


Рис. 6. Зависимость длины ахтерпика

В большинстве случаев салон «малого» пассажирского судна скомпонован с одним магистральным коридором и расположенными по бортам от него рядами сидений. Число рядов, в зависимости от ширины корпуса в данном районе, колеблется от двух до четырех на борт [12].

При нахождении длин салонов и определении влияния рядности на главные размерения представим длину пассажирского салона в виде

$$L_{\text{с}} = m_{\text{ПР}} \cdot l_{\text{ПР}} + l_{\text{доп}}, \tag{7}$$

где $m_{\text{ПР}} = \dfrac{n_{\text{пасс}}}{n_{\text{р}}}$ — количество поперечных рядов; $n_{\text{р}}$ — количество пассажиров в ряду (может быть задано как варьируемый параметр либо определяется по графику рис. 7 в зависимости от расчетной ширины судна); $L_{\text{ПР}}$ — расстояние между поперечными рядами. Данная величина варьируется в пределах 0,6 … 0,9м; $l_{\text{доп}}$ — дополнительная длина салона, включая длину посадочных площадок, которая с учетом требований [10], [13] должна составлять не менее 0,8 м. При условии, что выход из пассажирского салона должен быть обеспечен с обеих его сторон, данная величина может быть принята $l_{\text{доп}}$ = 1,6 м.

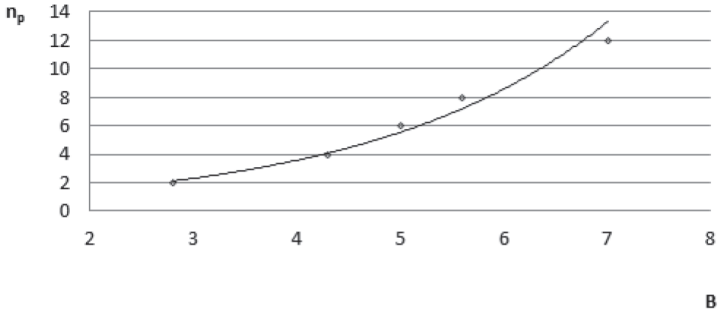


Рис. 7. Зависимость количества пассажирских мест в ряду от ширины судна

К числу вспомогательных помещений относятся туалеты, буфеты, служебные и другие помещения, распределенные по длине судна. На рис. 8 показана зависимость длины вспомогательных помещений от длины судна.

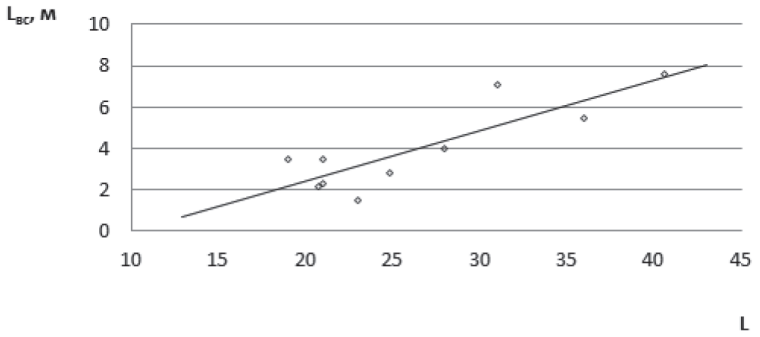


Рис. 8. Зависимость общей длины вспомогательных помещений от длины судна

В аналитическом виде выражения для графиков рис. 5 – 8 представлены в табл. 2.

Ширину пассажирского салона представим в виде зависимости от числа пассажирских мест в ряду $n_р$:

$$B_{ПС} = n_р \cdot l_{прод} + b_{доп}, \quad (8)$$

где $l_{прод}$ — расстояние между сиденьями продольного ряда. Данная величина варьируется в пределах 0,6 … 0,9 м (меньшее значение соответствует оборудованию стульями, верхнее — мягкими диванами); $b_{доп}$ — минимальная ширина магистрального коридора.

Расчетная ширина судна в этом случае будет представлена выражением

$$B = B_{ПС} + t_з + B', \quad (9)$$

где B' — ширина потопчины. Минимальная величина потопчины для палуб, не предназначенных для пассажиров (размещение элементов швартовного устройства) составляет 0,5 м, на палубах, предназначенных для пассажиров — не менее 0,8 м [10]; $t_з$ — зашивка и изоляция салона. Среднее значение толщины зашивки равно 0,1 – 0,15 м.

Таблица 2

Выражения неизвестных уравнения (2)

Выражение	Коэффициент корреляции R^2
$L_{МП} = 3{,}706 \ln(N) - 14{,}22$	0,887
$L_а = 4 \cdot 10^{-3} (LTv) + 0{,}797$	0,924
$L_{вс} = 0{,}243 L - 2{,}45$	0,72
$n_р = 0{,}623 \cdot e^{0{,}437B}$	0,983

Результаты анализа адекватности рассмотренных методик, приведенные в табл. 3, позволяют судить об их применимости. При расчете полученных данных учитывались фактическое количество пассажиров, размещаемых на соответствующих палубах, а также габариты проходов.

Таблица 3

Проверка применимости уравнений (1) и (5)

Номер проекта судна (АКТ)	L, м	B, м	LB, м^2	LB, м^2		Погрешность, %	
				по уравнению (1)	по уравнению (5)	по уравнению (1)	по уравнению (5)
1083 (I)	31	6	186	193,39	187,80	3,4	0,96
1570 (I)	40,6	6	243,6	292,47	249,92	16,71	2,53
544 (II)	24,8	4,45	110,36	115,13	113,64	4,14	2,89
Р35 (II)	36	5,3	190,8	210,67	193,8	9,4	1,54
222в (III)	23	3,7	85,1	98,52	85,13	13,62	0,04
930 (III)	23	3,7	85,1	89,46	88,71	4,88	4,07

Выводы

Обе предлагаемые методики носят приближенный характер. На начальной стадии проектирования, когда необходимо выполнить проверку пассажировместимости судна при принятых его размерах, можно использовать уравнения (1) и (5). Более точное решение получается при использовании второго метода (формулы (5) и (9)), при котором минимальные необходимые размеры судна находятся в зависимости от заданной пассажировместимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семин А. А.* Классификация способов оценки комфортабельности, как составляющий элемент проектирования судов и организации обслуживания пассажиров / А. А. Сёмин // Вісник Одеського національного морського університету. — 2013. — № 1. — С. 180–187.

2. *Леви Б. З.* Пассажирские суда прибрежного плавания / Б. З. Леви. — Л.: Судостроение, 1975. — 320 с.

3. *Семин А. А.* Влияние комфортабельности на выбор главных размерений пассажирских круизных судов внутреннего и смешанного плавания / А. А. Семин // Вісник ОНМУ. — 2005. — Вип. 17. — С. 39–45.

4. *Нгуен Д. Т.* Методика расчета основных характеристик пассажирских судов на воздушной подушке в первом приближении / Д. Т. Нгуен // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 1. — С. 17–25.

5. *Нгуен Г. Х.* Определение количества перевезенных пассажиров и продолжительности прямого сложного рейса быстроходного пассажирского судна с учетом стохастических факторов / Г. Х. Нгуен, В. А. Некрасов // Вісник НУК. — 2013. — № 1. — С. 27–29.

6. *Купальцева Е. В.* Анализ проектных характеристик главных элементов пассажирских судов для внутригородских и пригородных линий / Е. В. Купальцева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 119–126.

7. *Вицинский В. В.* Основы проектирования судов внутреннего плавания / В. В. Вицинский, А. П. Страхов. — Л.: Судостроение, 1970. — 454 с.

8. *Роннов Е. П.* Проектирование судов: учеб. пособие в 2 ч. / Е. П. Роннов. — Н. Новгород: ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. — 288с.

9. *Бронников А. В.* Проектирование судов: учебник / А. В. Бронников. — Л.: Судостроение, 1991. — 319 с.

10. Правила Российского Речного Регистра: в 4 т. — М., 2008. — Т. 2. — 406 с.

11. *Купальцева Е. В.* Определение составляющих нагрузки масс «малых» пассажирских судов на начальном этапе проектирования / Е. В. Купальцева // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — № 45. — С. 181–188.

12. *Чижиумов С. Д.* Примеры конструкций судов: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. — Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. — 133 с.

13. СанПиН 2.5.2.703-98. Водный транспорт. Суда внутреннего и смешанного (река – море) плавания. — Введен 01.07 1998.

DETERMINING THE PASSENGER CAPACITY OF A “SMALL” PASSENGER VESSEL AT THE INITIAL DESIGN STAGE

Two methods for determining passenger ships of this type offered. The first method is based on solving equations in which the unknown quantity is represented by a minimum size of the passenger deck ship, which is required to accommodate a given number of passengers. Unidentified this equation are determined based on statistical analysis. The level of comfort is given received specific useful area.

The second method is based on determining the optimum size of the vessel according to the predetermined passenger. Vessel length is represented as the sum of the lengths of the compartments, the distribution of which to the hull. Vessel width is calculated based on the number of rows, the size of the main passageway, linings vessel.

Check the adequacy of the proposed methods carried out. The results allow to draw conclusions about the validity of the data.

Keywords: passenger vessel, equation of passenger capacity, vessel’s dimensions, a level of comfort, arrangement of the vessel.

REFERNCES

1. Semin, A. A. "Klassifikatsia sposobov otsenki komfortabelnosti, kak sostavliaushiy element proektirovania sudov I organizatsii obsluzhivania passagirov." *Vestnik Odesskogo natsionalnogo morskogo universiteta* 1 (2013): 180–187.

2. Levi, B. Z. *Passazhirskie suda pribrezhnogo plavania*. L: Sudostroenie, 1975.

3. Semin, A. A. "Influence of comfort to choose the main dimensions of inland passenger cruise ships and combined navigation." *Vestnik Odesskogo natsionalnogo morskogo universiteta* 17 (2005): 39–45.

4. Nguyen, D. T. "Method of calculation of passenger hovercraft's basic characteristics to the first approximation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2014): 17–25.

5. Nguyen, G. H., and V. A. Nekrasov. "Determination of the number of passengers and the duration of the direct flight of complex high-speed passenger vessel, taking into account the stochastic factors." 1 (2013): 27–29.

6. Kupaltseva, E. V. "Analysis of the design characteristics of the main elements of inland vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 119–126.

7. Vicinskij, V. V., and A. P. Strahov. *Osnovy proektirovanija sudov vnutrennego plavanija*. L.: Sudostroenie, 1970.

8. Ronnov, E. P. *Proektirovanie sudov*. N. Novgorod: FGOU VPO «VGAVT», 2009.

9. Bronnikov, A.V. *Proektirovanie sudov*. L: Sudostroenie, 1991.

10. Russian River Register Rules. M, 2008. Vol. II.

11. Kupaltseva, E. V. "The definition components of the load mass of "small" passenger vessels at the initial design stage." *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta* 45 (2015): 181–188.

12. Chizhuimov, S. D. *Primery konstruktsiy sudov*. Komsomolsk-na-Amure: GOUVPO «KnAGTU», 2007.

13. Russian Federation. Sanitary rules and norms 2.5.2.703-98. Water transport. Vessels inland and river-sea navigation. 1998.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Купальцева Евгения Владимировна — аспирант.
Научный руководитель:
Роннов Евгений Павлович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
evgenia_kupaltseva@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kupaltseva Evgenija Vladimirovna — postgraduate.
Supervisor:
Ronnov Evgenij Pavlovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Volga state academy of water transport
evgenia_kupaltseva@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 марта 2016 г.

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

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-122-131
УДК 621.436

В. А. Жуков,
О. К. Безюков,
М. М. Махфуд

МОТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Использование присадок – распространенный метод обеспечения требуемых эксплуатационных свойств дизельного топлива, которое является основным для водного транспорта. Статья посвящена моторным испытаниям дизельного топлива, модифицированного многофункциональной присадкой «Nagroboost», оказывающей влияние на протекание процессов смесеобразования и сгорания в цилиндре дизеля, полноту сгорания топлива и обеспечивающей повышение топливной экономичности двигателя. Испытания, проведенные на нескольких моделях четырехтактных высокооборотных дизелей, включали снятие винтовых и нагрузочных характеристик в соответствии со стандартными методиками испытаний. Полученные результаты позволили установить, что применение присадки отечественного производства «Nagroboost» обеспечивает снижение удельного эффективного расхода топлива на 3 – 7 %. При проведении испытаний не были зафиксированы нарушения работы двигателей и увеличение дымности отработавших газов. На основании результатов испытаний сделан вывод о перспективности использования присадок такого типа с целью повышения топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания. Статья содержит рекомендации по проведению дальнейших исследований с целью внедрения присадки «Nagroboost» на водном транспорте.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, дизельное топливо, присадки, моторные испытания, винтовая и нагрузочная характеристики, расход топлива.

Введение

Анализ динамики потребления человечеством энергетических ресурсов свидетельствует о неуклонном повышении доли, потребляемой транспортом, которая составляет в настоящее время около 30 % [1]. Основным видом топлива для судовых энергетических установок в настоящее время является дизельное топливо. Ввиду того, что расходы на топливо составляют от 40 до 70 % общих эксплуатационных расходов, повышение топливной экономичности судовых дизелей остается одной из важнейших научно-технических задач.

Основными направлениями повышения топливной экономичности судовых дизелей являются оптимизация протекания рабочего цикла, прежде всего, за счет совершенствования процессов топливоподачи и смесеобразования в результате повышения давления впрыска топлива и применения электронных систем управления, а также утилизации вторичных энергетических ресурсов (теплоты, уносимой отработавшими газами и охлаждающей жидкостью).

Повышение топливной экономичности дизелей не должно сопровождаться увеличением вредных выбросов с отработавшими газами или снижением ресурсных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в связи с увеличением тепловых и механических нагрузок на детали цилиндро-поршневой группы. Поэтому исследование влияния свойств топлив ДВС на их эксплуатационные показатели представляется перспективным.

Применяемые материалы и методы решения задачи

Физико-химические и эксплуатационные свойства дизельного топлива определяются качеством углеводородного сырья, применяемой технологией производства, свойствами и массой введенных в его состав присадок и добавок и определяются на основе таких квалификационных

признаков, как вязкость и плотность, низкотемпературные свойства, температура застывания, химическая стабильность, коррозионная активность, противоизносные свойства, способность к самовоспламенению.

Вязкость и плотность определяют процессы испарения и смесеобразования в двигателе.

Низкотемпературные свойства характеризуются такими показателями, как температура помутнения $T_п$, предельная температура фильтруемости $T_ф$ и температура застывания $T_з$. Для дизельных топлив ГОСТ 305-82 [2] регламентирует температуру застывания летних дизельных топлив на уровне не выше минус 10 °С, а температура помутнения –5 °С.

Температура застывания зимних дизельных топлив регламентируется ГОСТом 305-82 [2] на уровне не выше –35 °С.

Химическая стабильность дизельного топлива — это способность противостоять окислительным процессам при хранении.

Коррозионная активность дизельных топлив характеризуется наличием в нем соединений серы.

Противоизносные свойства. Дизельное топливо является смазочным материалом для движущихся деталей топливной аппаратуры, пар трения плунжерных насосов, запорных игл, штифтов и других деталей. Для улучшения смазывающих свойств дизельных топлив должны применяться специальные противоизносные присадки.

Способность к самовоспламенению — это показатель, оказывающий влияние на режим воспламенения и сгорания дизельного топлива в камере сгорания двигателя и как следствие оказывающий непосредственное влияние на динамику рабочего процесса, вибрацию и шум двигателя, на его мощностные показатели и экономичность, а также токсичность отработавших газов.

Следует отметить, что от качества топлива, показатели которого устанавливаются ГОСТом 305-82 [2], в значительной степени зависят экономические, экологические и ресурсные показатели двигателей внутреннего сгорания. При производстве дизельного топлива, представляющего собой смесь дистиллятов (солярового, газойля и керосинового) с продуктами каталитического и гидрокрекинга, требуемые свойства дизельного топлива получаются за счет введения многофункциональных присадок [3]. Активно ведутся исследования по разработке присадок к дизельному топливу, которые могут быть использованы в процессе эксплуатации с целью совершенствования физико-химических свойств топлива и улучшения показателей работы двигателя [4] – [6]. К таким присадкам относится модификатор дизельного топлива «Nagroboost», разработанный под руководством А. С. Новикова. Состав модификатора, его свойства и механизм действия описаны в работе [7].

Целью проведенных исследований была оценка влияния модификации дизельного топлива присадкой «Nagroboost» при работе судовых высокооборотных дизелей. Объектами испытаний являлись дизельные двигатели, приведенные в табл. 1

Таблица 1

Двигатели, участвовавшие в испытаниях

Марка двигателя	Мощность, кВт		Частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$	Среднее эффективное давление, МПа	Тип охлаждения
	номинальная	литровая			
2Ч 11/13	18,5	8,2	1500	0,67	Жидкостное
4Ч 8,5/11	12,6	7,8	1500	0,6	Жидкостное
DD4000E	2,8	9,3	3000	0,4	Воздушное
2Ч 8/7,9	8	10	3000	0,4	Жидкостное

Испытательные стенды, созданные на базе указанных двигателей, обеспечили возможность изменить нагрузочный и скоростной режимы работы двигателей, измерить расход топлива

и контролировать температуру моторного масла, охлаждающей жидкости и отработавших газов. В качестве устройств для изменения нагрузки использовались гидравлический и электрический тормоза, расход топлива определялся весовым методом. Для определения температуры в системах смазки и охлаждения использовались лабораторные термометры, установленные в трубопроводах систем смазки, охлаждения, впуска и выпуска.

Испытания проводились в два этапа. Целью первого этапа было определение эффективности действия присадок к дизельному топливу при работе дизелей по винтовой и нагрузочной характеристикам, являющимся наиболее значимыми для них. Целью второго этапа явилось определение влияния концентрации присадки на эффективность ее действия.

Проведение испытаний и обработка их результатов осуществлялись по ГОСТ Р ИСО 3046-1-99 [8] с учетом указаний и рекомендации источников [9] – [11].

Результаты

Винтовая характеристика представляет собой зависимость показателей работы двигателя от частоты вращения коленчатого вала при работе на гребной винт. Определяющим фактором для этих условий является собственно характеристика гребного винта как нагрузочного устройства дизеля. Специфика винта состоит в том, что для водоизмещающих судов поглощаемые винтом момент и мощность изменяются, соответственно, по квадратичной и кубической параболам, следовательно, ввиду малых механических потерь в передаче и эффективных энергетических показателей дизеля, будут иметь место квадратичные и кубические зависимости от частоты вращения коленчатого вала [12]:

$$M_e = c_1 \cdot n^2;$$

$$p_e = c_2 \cdot n^2;$$

$$N_e = c_3 \cdot n^3.$$

При проведении исследований винтовая характеристика снималась на стенде, включающем следующие устройства:

– двухцилиндровый четырехтактный двигатель 2Ч 11/13 с объемно-пленочным смесеобразованием в камере сгорания в поршне;

– гидротормоз, позволяющий моделировать работу двигателя по винтовой характеристике с измерением крутящего момента;

– двухконтурную систему охлаждения с водо-водяным охладителем;

– комплекс измерительной аппаратуры, обеспечивающей замеры частоты вращения коленчатого вала двигателя, крутящего момента, часового расхода топлива, температур отработавших газов, охлаждающей жидкости и моторного масла.

Условия проведения испытаний: топливо дизельное летнее [2], контрольная порция топлива 100 г, количество параллельных измерений — 3 … 5, атмосферное давление 771 мм рт. ст., относительная влажность 78 %, температура в лаборатории +20 °С, концентрация присадки к топливу — 0,15 % (по массе).

Эффективная мощность дизеля N_e, кВт, при проведении испытаний определялась по формуле

$$N_e = K_т P_т n, \quad (1)$$

где $K_т$ = 0,00901 — постоянная гидротормоза, кВт / (Н·мин$^{-1}$); $P_т$ — показание гидротормоза, ед.; n — частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$.

На первом этапе при массовом определении расхода топлива часовой расход топлива $G_т$, кг/ч, рассчитывался по формуле

$$G_т = 3600 \frac{\Delta G_т}{\Delta \tau_т}. \quad (2)$$

При использовании объемного метода определения расхода топлива использовалась формула

$$G_{т} = 3600\frac{\Delta G_{т}}{\Delta \tau_{т}}. \quad (3)$$

Для определения удельного эффективного расхода топлива g_e, г/(кВт·ч), используется выражение

$$g_e = \frac{G_{т}}{N_e}10^3. \quad (4)$$

Результаты испытания двигателя 2Ч 11/13 по винтовой характеристике представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Испытания дизеля 2Ч11/13 по винтовой характеристике

№ пп.	Частота вращения, мин$^{-1}$	Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С
		%	кВт				
Топливо без присадки							
1	940	25	4,6	228,3	1,58	160	60
2	1200	50	9,2	145	2,48	270	69
3	1360	75	13,9	95,7	3,76	360	72
4	1500	100	18,5	74,6	4,82	400	78
Модифицированное топливо							
1	940	25	4,6	238	1,51	170 (+6 %)	65 (+8,3 %)
2	1200	50	9,2	151	2,51	270	75 (+8,6 %)
3	1360	75	13,9	100	3,60	370 (+3 %)	82 (+13,8 %)
4	1500	100	18,5	78,3	4,60	450 (+12,5 %)	85 (+9 %)

Таблица 3

Изменение удельного эффективного расхода топлива при работе двигателя 2Ч11/13 по винтовой характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e, %	Удельный эффективный расход топлива g_e, кг/(кВт·ч)		Изменение удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо	
25	0,350	0,330	–5
50	0,270	0,260	–3
75	0,270	0,260	–3
100	0,260	0,250	–3

Полученные в результате испытаний данные свидетельствуют о том, что введение в топливо присадки в количестве 0,15 % приводит к снижению его расхода на 4,0 … 4,5 % во всем диапазоне мощностных нагрузок при работе двигателя 2Ч11/13 по винтовой характеристике. При испытаниях двигателя, работающего на топливе, содержащем присадку, было зафиксировано увеличение температуры отработавших газов на 3 … 12 % (максимальное увеличение имело место на режиме номинальной мощности) и температуры охлаждающей жидкости на 8 … 14 % (максимальное увеличение также имело место на режимах близких к номинальной мощности). Данные изменения

температур свидетельствуют о перераспределении составляющих теплового баланса, анализ которого может быть произведен с использованием информации, приведенной в работах [13], [14].

Испытания по нагрузочной характеристике, которая представляет собой зависимость показателей работы двигателя от нагрузки, проводилась на стендах, включающих:

– двигатели 4 Ч8,5/11, DENZEL DD4000E, 2Ч 8/7,9;

– электрические генераторы, обеспечивающие изменение нагрузки на дизель;

– комплекс измерительной аппаратуры, обеспечивающий замеры частоты вращения коленчатого вала двигателя, крутящего момента, часового расхода топлива, температур отработавших газов, охлаждающей жидкости, моторного масла.

Нагрузочная характеристика является основной для судовых вспомогательных двигателей, работающих в составе генераторных станций, обеспечивающих постоянство частоты тока при переменных нагрузках. Обязательным условием снятия нагрузочной характеристики является постоянство частоты вращения коленчатого вал двигателя.

Условия проведения испытаний: топливо дизельное летнее [2], контрольная порция топлива 200, 300 г, количество параллельных измерений — 3 … 5, атмосферное давление 771 мм рт. ст., относительная влажность 78 %, температура в лаборатории +20 °С, концентрация присадки к топливу — 0,15 % (по массе).

Расчет часового и удельного эффективного расхода топлива выполнялся по формулам (1) – (4). Результаты испытаний двигателей указанных марок по нагрузочной характеристике представлены в табл. 4 – 6.

Таблица 4

Результаты испытаний дизеля 4 Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике

Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С
%	кВт				
Топливо без присадки					
25	3,0	347	2,07	185	82
50	6,9	240,5	2,99	280	84
75	9,9	185,3	3,89	410	82
100	12,6	145,7	4,94	450	82
Модифицированное топливо					
25	3,0	355	2,03	180 (–2,7 %)	80
50	6,9	257	2,80	250 (–10,7 %)	80
75	9,9	191	3,77	380 (–7,3 %)	80
100	12,6	154	4,67	480 (+6,7 %)	80

Таблица 5

Изменение часового и удельного эффективного расхода топлива при работе двигателя 4Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e, %	Удельный эффективный расход топлива g_e, кг/(кВт·ч)		Изменение часового расхода топлива, %	Изменения удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо		
25	0,690	0,680	–1	–2 %
50	0,440	0,410	–6	–6,4 %
75	0,400	0,380	–5	–3,1 %
100	0,400	0,370	–7	–5,5 %

Таблица 6

Результаты испытаний двигателей по нагрузочной характеристике

Эффективная мощность двигателя N_e, %	Время расходования контрольной порции топлива Δt, с		Часовой расход топлива G_m, кг/ч		Удельный эффективный расход топлива g_e, г/(кВт·ч)		Изменение удельного эффективного расхода топлива, %
	базовое топливо	модифицированное топливо	базовое топливо	модифицированное топливо	базовое топливо	модифицированное топливо	
Двигатель DENZEL DD4000E							
25	554	567	0,545	0,533	778	762	–2,1
50	437	455	0,692	0,664	494	474	–4,1
75	346	365	0,873	0,828	416	394	–5,3
100	282	292	1,072	1,035	382	370	–3,2
Двигатель 2 Ч8/7,9							
25	638	654	1,422	1,387	710	693	–2,4
50	556	576	1,636	1,575	408	394	–3,5
75	458	476	1,981	1,906	330	318	–3,7
100	381	395	2,381	2,297	298	287	–3,7

Второй этап исследований проводился на стенде, созданном на базе двигателя 4Ч8,5/11 при его работе по нагрузочной характеристике, контрольная порция топлива составила 100 г. Концентрация присадки в топливе составила 0,15; 0,175; 0,20; 0,25 %. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты испытаний двигателя 4Ч8,5/11 при его работе по нагрузочной характеристике

№ пп.	Мощность двигателя		Время расходования контрольной порции топлива, с	Часовой расход топлива, кг/ч	Температура отработавших газов, °С	Температура охлаждающей жидкости, °С	Изменение часового расхода топлива, %
	%	кВт					
1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация присадки — 0,15 %							
1	25	3,2	172	2,07	185	82	–1
2	50	6,45	121	2,99	280	84	–6
3	75	9,7	92	3,89	410	82	–5
4	100	12,9	73	4,94	450	82	–7
Концентрация присадки — 0,175 %							
1	25	3,2	170,3	2,12	185	76	+1,0 %
1	2	3	4	5	6	7	8
2	50	6,45	127,7	2,82	250	77	–6,0 %
3	75	9,7	94	3,83	360	74	–1,0 %
4	100	12,9	74	4,87	480	64	–2,0 %

Таблица 7
(*Окончание*)

Концентрация присадки — 0,2 %							
1	25	3,2	172,6	2,09	180	79	–1,0 %
2	50	6,45	120	3,00	240	79	–9,0 %
3	75	9,7	92,3	3,90	380	75	–7,0 %
4	100	12,9	72,5	4,97	510	72	–6,0 %
Концентрация присадки — 0,25 %							
1	25	3,2	171,3	2,11	185	79	+1,0 %
2	50	6,45	128,3	2,81	245	82	–6,0 %
3	75	9,7	95	3,79	350	80	–2,0 %
4	100	12,9	75,5	4,77	480	77	–4,0 %

При испытаниях двигателя 4Ч8,5/11 по нагрузочной характеристике установлено, что изменение концентрации присадки оказывает влияние на эффект от ее использования:

– при концентрации 0,15 % снижение расхода топлива на всех режимах работы от 2 до 6 %;

– при концентрации 0,175 % изменения расхода топлива составляет от увеличения на 1 % до снижения на 6 %, на большинстве режимов изменения близки к погрешности измерений;

– при концентрации 0,20 % снижение расхода топлива на всех режимах работы от 1,0 до 9 %, на большей части режимов снижение расхода топлива составляет 6 … 7 %;

– при концентрации 0,25 % изменения расхода топлива находились в пределах от –6 до +1 %, на большинстве экспериментальных режимов снижение расхода топлива составило 2 … 4 %.

На температуру отработавших газов и охлаждающей жидкости изменение концентрации присадки существенного и направленного влияния не оказывает.

Обсуждение полученных результатов

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

– введение в топливо присадки в количестве 0,15 % приводит к снижению часового расхода топлива на 2,0 … 6,5 % во всем диапазоне скоростных и мощностных режимов при работе двигателей как по винтовой, так и по нагрузочной характеристике;

– при испытаниях двигателей, работающих на топливе, содержащем присадку, было зафиксировано увеличение температуры отработавших газов на 6,7 % на режиме номинальной мощности и снижение температуры отработавших газов на 3 … 10 % на долевых нагрузках;

– температура охлаждающей жидкости на всех режимах понизилась на 3 … 5 %.

Результаты моторных испытаний подтверждают, что введение в топливо присадки «Nagroboost» оказывает влияние на протекание рабочего процесса в цилиндре дизеля. Увеличение цетанового числа в результате введения присадки приводит к сокращению периода задержки воспламенения, смещению процесса сгорания к верхней мертвой точке и перераспределению тепловых потоков.

Выводы и практические рекомендации

1. Полученные результаты испытаний позволяют сделать вывод, что наиболее целесообразным является применение присадки в концентрации 0,2 % от массы топлива. При увеличении или уменьшении концентрации присадки наблюдается ослабление положительного эффекта ее применения.

2. В процессе проведения испытаний было отмечено снижение дымности работы двигателей. Для количественной оценки влияния присадки на экологические показатели работы дизелей необходимо использование специальных приборов и оборудования.

3. Проведенные моторные испытания дизельного топлива, модифицированного присадкой «Nagoboost» свидетельствуют о перспективности ее применения на водном транспорте, так как малые концентрации присадки обеспечивают снижение расхода топлива при работе судовых дизелей как по винтовой, так и по нагрузочной характеристикам.

4. С целью разработки рекомендаций по применению универсальной комплексной присадки для топлив «Nagroboost» на речном и морском флоте необходимо продолжить исследования и провести комплекс испытаний, включающий:

– индицирование рабочего процесса дизеля, работающего на топливе, содержащем присадку;

– определение составляющих теплового баланса при использовании модифицированного присадкой топлива;

– измерение токсичности и дымности отработавших газов при использовании топлива, содержащего присадку;

– определение влияния угла опережения впрыска топлива на эффективность присадки.

5. Для внедрения присадки на водном транспорте целесообразно провести испытания присадки «Nagroboost» под надзором Российского речного регистра и Российского морского регистра судоходства при участии разработчиков присадки и организаций, заинтересованных в ее использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безюков О. К.* Динамика потребления энергетических ресурсов и повышение эффективности их использования / О. К. Безюков, Е. В. Ерофеева, В. А. Жуков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. — 2015. — № 1 (214). — С. 41–48. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048.

2. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 12 с.

3. *Данилов А. М.* О производстве дизельных топлив в соответствии с регламентом таможенного союза / А. М. Данилов, Е. Б. Шевченко // Двигателестроение. — 2012. — № 4. — С. 42–44.

4. *Халикова Д. А.* Актуальность проблемы разработки цетаноповышающих присадок к дизельному топливу / Д. А. Халикова, Т. С. Меньшикова // Вестник Казанского технологического университета. — 2011. — № 2. — С. 110–112.

5. *Зинина Н. Д.* Депрессорно-диспергирующая присадка для гидроочищенного экологически чистого дизельного топлива / Н. Д. Зинина, К. Ю. Симанская, М. В. Павловская, Д. Ф. Гришин // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. — 2014. — № 8. — С. 37–40.

6. *Спиркин В. Г.* Моюще-диспергирующая присадка для дизельного топлива / В. Г. Спиркин, И. Р. Татур, В. А. Лазарев [и др.] // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2014. — № 1 (274). — С. 86–97.

7. *Безюков О. К.* Современные присадки к дизельному топливу / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. М. Маад // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2016. — № 1 (61). — С. 28–33.

8. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Ч. 1. Стандартные условия, объявленная мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. — 24 с.

9. *Райков И. Я.* Испытания двигателей внутреннего сгорания / И. Я. Райков. — М.: Высш. шк, 1975. — 320 с.

10. *Прокопенко Н. И.* Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания / Н. И. Прокопенко. — СПб.: Изд-во «Лань», 2010. — 592 с.

11. *Гаврилов В. В.* Испытания дизеля 2Ч 11/13 по нагрузочной и винтовой характеристикам / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПГУВК, 2011. — 50 с.

12. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2008. — Т. 2. — 470 с.

13. *Жуков В. А.* Система автоматизированного сбора информации при испытаниях двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2011. — № 1. — С. 172–177.

14. *Жуков В. А.* Автоматизация теплобалансных испытаний двигателей внутреннего сгорания / В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2011. — № 2. — С. 50–52.

MOTOR TESTS OF DIESEL ENGINE'S FUEL WITH MODIFICATION

The using of additives is one of the most wide-spread method of provide of diesel fuel's properties which are required. Now diesel fuel is the main type of fuel for water transport. The article is devoted to motor tests of diesel engine's fuel with modification. This modification was made by polyfunctional additive "Nagroboost" which have influence on processes of air and fuel mixed and combustion in engine's cylinder, completeness of fuel combustion, and ensuring a fuel economy. The test, which was conducted on a few models of four-stroke high-rotation diesel engines, included receipt of screw and load characteristics according standard methods of engine's tests. Results of tests shown that using of native additive «NagroBoost» ensure lowering of fuel consumption by 3-7 per cent. During the test breach of engine's working and increase of emission of toxic components with outlet gases were not fixed. The conclusion about perspective of using this additive at fuel in the aim of lower fuel consumption is done. The article contains recommendation to conduct future investigation for application addition «Nagroboost» on water transport.

Keywords: internal combustion engines, diesel fuel, additive, motor tests, screw and load characteristics, fuel consumption.

REFERENCES

1. Bezukov, O. K., E. V. Erofeeva, and V. A. Zhukov. "The dinamic of consumption of energy resources and increase of effectiveness of it's using." *Handbook. An engineering journal with appendix* 1(214) (2015): 41–48. DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048.

2. Russian Federation. GOST 305-82. Toplivo dizelnoe. Tehnicheskie uslovija. M.: Izdatelstvo standartov, 1982.

3. Danilov, A. M., and E. B. Shevchenko. "Diesel Fuel To Be Produced in Compliance with Customs Union's Regulations." *Dvigatelestroyeniye* 4 (2012): 42–44.

4. Halikova, D. A., and T. S. Menshikova. "Aktualnost problemy razrabotki cetanopovyshajushhih prisadok k dizelnomu toplivu." *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* 2 (2011): 110–112.

5. Zinina, N. D., K. Yu. Simanskaya, M. V. Pavlovskaya, and D. F. Grishin. "Depressor-dispersing additive for hydrocleared ecologically pure diesel fuel." *Neftepererabotka i neftehimija. Nauchno-tehnicheskie dostizhenija i peredovoj opyt* 8 (2014): 37–40.

6. Spirkin, Vladimir G., Igor R. Tatur, Vladimir A. Lazarev, Yuri L. Shishkin, and Alexei V. Leontiev. "Detergent-dispersant additive for diesel fuel." *Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza im. I.M. Gubkina* 1(274) (2014): 86–97.

7. Bezyukov, Oleg Konstantinovich, Vladimir Anatolievich Zhukov, and Makhfud Mohhamed Maad. "Modern additives for diesel fuel." *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1(61) (2016): 28–33.

8. Russian Federation. GOST R ISO 3046-1-99 Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevye. Harakteristiki. Chast 1. Standartnye uslovija, objavlennaja moshhnost, rashody topliva i smazochnogo masla. Metody ispytanij. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2000.

9. Rajkov, I. Ja. *Ispytanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. M.: Vyssh. shkola, 1975.

10. Prokopenko, N. I. *Jeksperimentalnye issledovanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. SPb.: Izd. "Lan", 2010.

11. Gavrilov, V. V. *Ispytanija dizelja 2Ch 11/13 po nagruzochnoj i vintovoj harakteristikam*. SPb.: SPGUVK, 2011.

12. Voznickij, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgranija*. Vol. 2. M.: Morkniga, 2008.

13. Zhukov, V. A., and E. N. Nikolenko. "Sistema avtomatizirovannogo sbora informacii pri ispytanijah dvigatelej vnutrennego sgoranija." *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tehnologicheskoj akademii im. P.A. Soloveva* 1 (2011): 172–177.

14. Zhukov, V.A., and Y. N. Nikolenco. "Automation of heat balance tests of internal combustion engines." *Internal Combustion Engines* 2 (2011): 50–52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Махфуд Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov Vladimir Anatoljevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Bezjukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makhfud Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezjukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-131-137
УДК 621.43: 629.12.004.62

Ю. Н. Цветков,
Е. О. Горбаченко

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИИ МАТЕРИАЛОВ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА КАВИТАЦИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Проведены испытания серого чугуна СЧ24 и стали 38ХМ на кавитационное изнашивание. Эксперименты осуществляли в пресной воде на магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора равных, соответственно, 22 кГц и 28 мкм. В процессе испытаний производили периодическое взвешивание образцов и измерение шероховатости их поверхности. Построены зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонение профиля поверхности образцов от времени. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной линии, которая делится точками перелома на три участка. Сопоставительный анализ зависимости износа от времени и зависимости среднего арифметического отклонения профиля от времени для каждого из испытанных материалов позволил установить, что указанные переломы свидетельствуют о смене ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности. Показано, что по точке перелома, отделяющей первый участок от второго, можно судить о продолжительности инкубационного периода изнашивания.

Ключевые слова: судовой дизель, втулка цилиндра, кавитационный износ, шероховатость поверхности, инкубационный период изнашивания

Введение

Кавитационный износ является распространённым видом повреждений охлаждаемых водой поверхностей втулок и блоков цилиндров судовых дизелей [1] – [6]. Причиной износа является вибрация стенок втулок, возникающая при ударах поршня по втулке в момент его перекладки, приводящая к возникновению вибрационной кавитации в охлаждающей жидкости. Так, например, кавитационные разрушения часто происходили в двигателях 3Д6 [1], [2] (рис. 1), в результате чего

втулки их цилиндров выходили из строя уже после 1500 – 2300 ч эксплуатации при моторесурсе 12 000 ч [3]. В дизелях 6Д50М, установленных на больших морских рыболовецких траулерах, кавитационный износ возникал на средних частях боковых поверхностей втулок: зоны износа имели размеры 110 × 60 мм и глубину до 13 мм [4]. В этих же дизелях неоднократно был зарегистрирован кавитационный износ блоков цилиндров. По причине кавитационного износа втулки цилиндров двигателей 6НФД48У нередко приходилось заменять уже после приблизительно 18 000 ч эксплуатации, тогда как ресурс втулок, рассчитанный по скорости изнашивания их поверхности трения — «зеркала», был равен примерно 30 000 ч [3].

а) б)

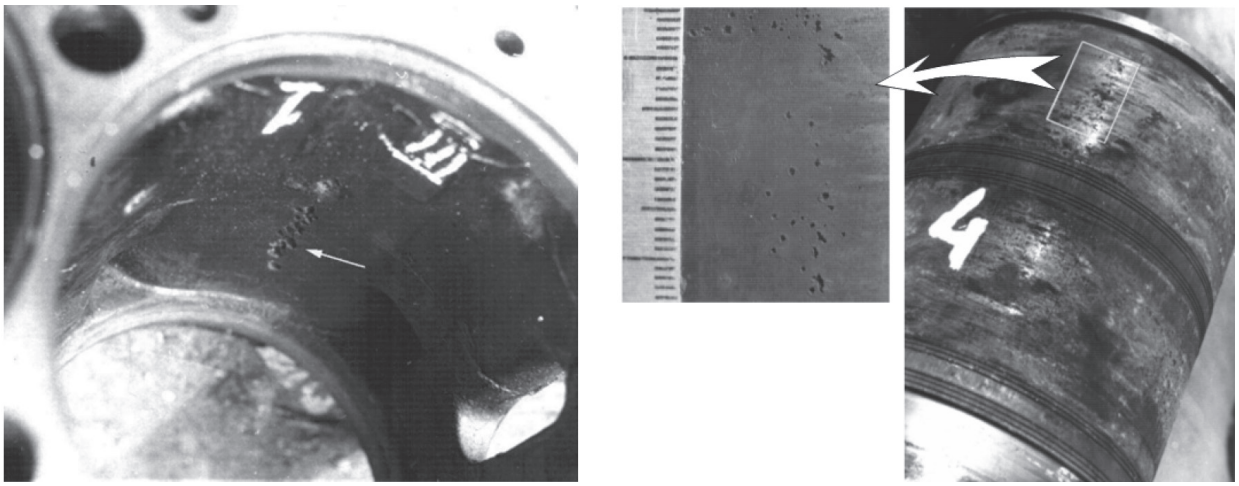


Рис. 1. Кавитационный износ блока цилиндров (*а*)
и втулки цилиндра (*б*) дизеля 3Д6 теплохода РБТ-8 (данные В. В. Капустина)

Теоретическому и экспериментальному исследованию кавитационного изнашивания водохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания в настоящее время уделяют серьёзное внимание [7], [8]. Увеличение частоты вращения коленчатого вала и уменьшение массы и габаритов современных двигателей ведёт к уменьшению толщины втулки, что заметно увеличивает скорость её колебательного движения и, как следствие, повышает вероятность возникновения кавитационного разрушения. Это позволяет утверждать, что проблема кавитационного изнашивания водоохлаждаемой поверхности втулок судовых дизелей в ближайшей перспективе останется актуальной.

Существуют различные направления борьбы с кавитационным изнашиванием втулок цилиндров дизелей [1], [2], [9], а именно: добавление в охлаждающую жидкость различных присадок, химико-термическая обработка втулок, нанесение на их водоохлаждаемую поверхность различных покрытий. Реализация указанных направлений подразумевает трудоёмкие лабораторные испытания материалов втулок на кавитационную износостойкость. Известно, что отделение материала с поверхности, подверженной кавитационному воздействию, происходит после определённого периода времени, называемого *инкубационным*, или *аккумуляционным периодом*. В течение инкубационного периода происходит наклёп поверхностного слоя, и после того, как запас пластичности металла поверхностного слоя иссякнет, начинается образование микротрещин, а, после их слияния, отделение частиц износа [10], [11]: скорость потерь массы быстро возрастает и достигает максимального значения. При сравнительных испытаниях важно надёжно определять продолжительность инкубационного периода, так как процессы накопления повреждений в течение инкубационного периода определяют кинетику последующего процесса отделения продуктов изнашивания, и от продолжительности инкубационного периода зависит скорость изнашивания. В этой связи важным является разработка методики ускоренной оценки продолжительности инкубационного периода при лабораторных испытаниях на кавитационную износостойкость.

В работе [12] показана перспективность применения метода измерения шероховатости поверхности, подверженной кавитационному воздействию, для оценки инкубационного периода. Современная техника для измерения профиля поверхности позволяет проводить измерения шероховатости очень быстро, и введение этой процедуры в эксперимент не увеличивает его продолжительность.

Цель работы — анализ возможности применения метода измерения шероховатости поверхности для определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания материалов, применяемых для изготовления втулок цилиндров судовых дизелей.

Методика эксперимента. Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на магнитострикционном вибраторе [10] в мягкой пресной воде при температуре 20 ± 3 °С. Частота колебаний концентратора составляла около 22 кГц, а амплитуда колебаний торца концентратора на магнитострикционном вибраторе — 28 мкм. Как известно, самыми распространёнными материалами для изготовления втулок цилиндров судовых дизелей являются серый перлитный чугун и среднеуглеродистые низколегированные стали, содержащие хром, молибден, алюминий, в частности сталь 38Х2МЮА. Поэтому для испытаний выбрали серый чугун СЧ24 и сталь 38ХМ как близкую по составу и свойствам стали 38Х2МЮА. Образцы из стали имели цилиндрическую форму диаметром и высотой примерно 15 и 10 мм соответственно, а образцы из чугуна имели форму прямоугольных параллелепипедов размером 16 × 16 × 8 мм. Поверхность образцов, которую предполагалось подвергнуть кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали, а затем полировали. Для крепления испытываемого образца в ёмкости с водой использовали специальную оправку. Последнюю устанавливали так, чтобы расстояние между плоской поверхностью образца и торцом концентратора было равно 0,5 мм.

В процессе испытаний образцы периодически вынимали из оправки, промывали, высушивали и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг, а затем проводили измерения шероховатости. Оценку шероховатости производили с помощью профилометра *MarSurf PS1*, на котором регистрировали среднее арифметическое отклонение профиля R_a (ИСО 4287-1997). Во всех измерениях шероховатости базовая длина была одинаковой и равнялась 0,8 мм. Базовую длину выбирали из условия, чтобы траектория движения щупа прибора (длина оценки равнялась пяти базовым длинам) не выходила за площадь очага износа, но при этом пересекала как можно больший его участок.

Анализ результатов эксперимента. На рис. 2 и 3 представлены результаты экспериментов, соответственно, на стали 38ХМ и сером чугуне СЧ24 в пресной воде. Для наглядности зависиости потерь массы ΔM и среднего арифметического отклонения профиля R_a от продолжительности t испытаний на кавитационное изнашивание размещены одна над другой.

Сравнительный анализ графиков $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$ позволяет сделать вывод об их внешнем сходстве (рис. 2) на основе данных источника [12], однако, если изменение потерь массы во времени хорошо описывается плавной кривой, то изменение высоты неровностей поверхности с течением времени удобно аппроксимировать ломаной линией.

Присутствующие естественным образом как точки стыка прямолинейных участков на указанной ломаной линии точки перелома условно делят её на три характерные участка (на графике обозначены римскими цифрами *I*, *II* и *III*). Каждый участок соответствует отрезку времени, в течение которого доминирует определённый фактор, ответственный за увеличение неровностей поверхности. Наступление перелома на зависимости $R_a(t)$ указывает на смену этих факторов. Сравнивая зависимости $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$, можно предположить, что на участке *I* увеличение параметра R_a происходит за счёт образования вмятин при ударах капель и микроструй о поверхность: на этом участке имеет место пластическая деформация поверхности без существенных потерь массы. На участке *II* основным в увеличении параметра R_a является начавшийся процесс отделения частиц износа с поверхности, на которой наряду с участками деформированной поверхности, с которых ещё не отделялись частицы, существуют участки, с которых материал уже отделился. На участке *III* наступила стабилизация: верхний слой исходной поверхности, получивший предельную степень наклёпа в течение инкубационного периода, полностью удалён с поверхности, и частицы износа начали отделяться уже с изношенной поверхности, при этом скорость увеличения высоты неровностей резко замедлилась.

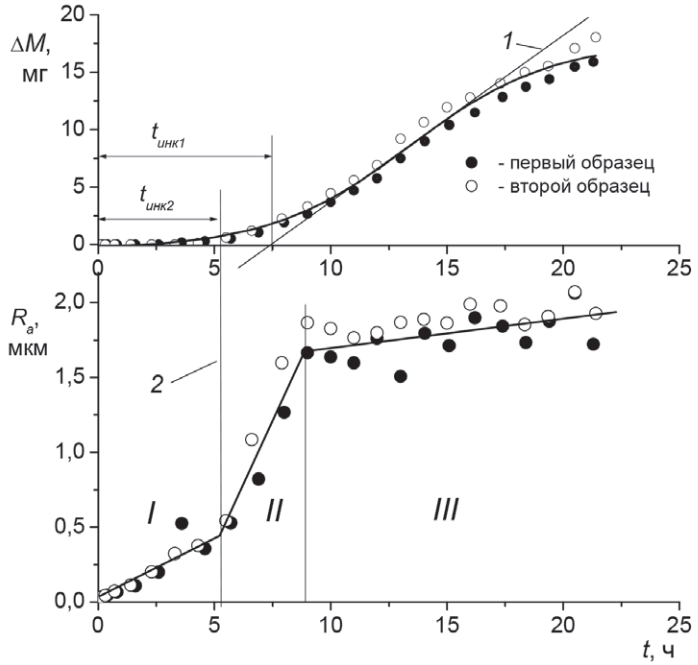


Рис. 2. Зависимости потери массы образцов из стали 38ХМ и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в пресной воде

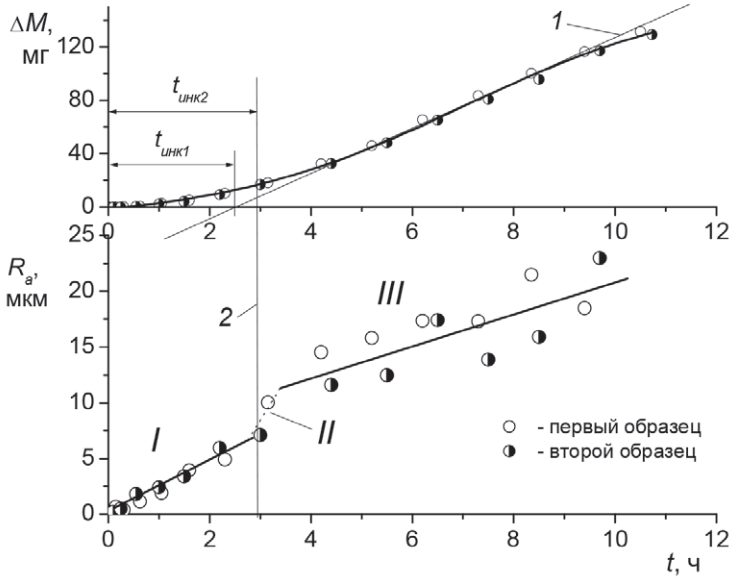


Рис. 3. Зависимости потерь массы образцов из серого чугуна СЧ24 и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в пресной воде

Если ранее изложенное верно, то первая точка перелома (граница между участками *I* и *II*) должна соответствовать окончанию инкубационного периода. Действительно, на рис. 2 показаны продолжительности инкубационного периода $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$, определенные двумя способами: 1) традиционным, по точке пересечения с осью абсцисс прямой *1*, проведённой касательно к кривой $\Delta M(t)$ через точку её перегиба; 2) способом, предлагаемым в данной статье, по точке пересечения с осью абсцисс перпендикуляра *2*, проведённого из первой точки перелома на ломаной $R_a(t)$. Разница между значениями $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$ в рассматриваемом случае составила менее 30 %.

Необходимо отметить, что закономерности кинетики изменения шероховатости, обнаруженные на стали 38ХМ, подтвердились также ранее при испытаниях сталей 25Л, 08Х14НДЛ и 08Х15Н4ДМЛ, используемых для изготовления гребных винтов. При этом для них разница между продолжительностями $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$ оказалась существенно меньшей или отсутствующей вообще. Преимущество в использовании величины $t_{инк2}$ состоит в том, что она привязана к моменту смены одного ведущего фактора (пластического деформирования поверхности) в образовании неровностей на другой (отделение частиц износа). Тогда как величина $t_{инк1}$, по сути, является условной.

Ранее изложенное подтвердилось также и результатами испытания серого чугуна (рис. 3), которые в целом согласуются с результатами опытов на стали 38ХМ. Однако характер изменения шероховатости поверхности серого чугуна СЧ24 при кавитационном воздействии несколько отличается от аналогичного для стали. Как видно из рис. 3, отрезок *II* при испытании чугуна получается очень коротким, и фактически на зависимости $R_a(t)$ образуется не перелом, а разрыв. Это обусловлено, по всей видимости, тем, что кавитационное разрушение чугуна, в отличие от стали, имеет хрупкий характер. Хрупкому разрушению способствует наличие пластинчатых графитовых включений, у острых углов которых создаётся концентрация напряжений [2]; из-за пренебрежимо низкой кавитационной износостойкости графита графитовые включения, по сути, играют роль пустот, существенно сокращая путь распространения трещин до их слияния и, соответственно, время до начала отделения частиц износа. Чтобы показать, что это действительно так, были проведены дополнительные эксперименты чугуна в искусственной морской воде следующего состава: NaCl — 2,46 % (по массе); KCl — 0,067 %; $CaCl_2 \times 2H_2O$ — 0,136 %; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,629 %; $MgCl_2 \times 6H_2O$ — 0,466 %; $NaHCO_3$ — 0,018 %. Выбор морской воды обусловлен тем, что ранее был обнаружен хемомеханический эффект при совместном действии в искусственной морской воде механического (кавитационных микроударов) и химического (электрохимической коррозии) факторов. Хемомеханический эффект проявляется в пластифицирующем воздействии коррозионной среды [13] и в данном случае должен уменьшить негативное влияние графитовых включений на пластичность чугуна.

Как видно из сравнения графиков на рис. 3 и 4, в результате хемомеханического эффекта продолжительность инкубационного периода при изнашивании чугуна в морской воде возросла, соответственно более длинным получился участок *I* зависимости $R_a(t)$ и в результате более продолжительным и выраженным получился период *II.* Участок *III* зарегистрировать не удалось из-за сильно возросшей высоты неровностей и превышения предельного значения, установленного для профилометра *MarSurf PS1*.

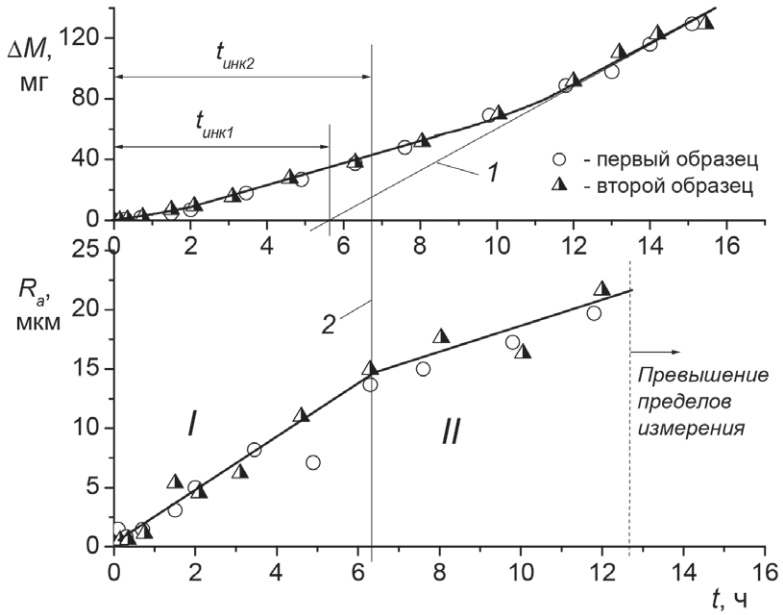


Рис. 4. Зависимости потерь массы образцов из серого чугуна СЧ24 и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в искусственной морской воде

Следует отметить, что в отличие от рис. 2 и 3, а также результатов, полученных ранее на разных сталях, при испытании чугуна в искусственной морской воде наклон участка *II* по сравнению с участком *I* уменьшился. Вместе с тем, окончание инкубационного периода по-прежнему сопровождается переломом на графике $R_a(t)$, что подтверждает надёжность метода измерения шероховатости для определения продолжительности инкубационного периода.

Выводы

1. Зависимости высотного параметра шероховатости поверхности стали 38ХМ и серого чугуна СЧ24 от продолжительности кавитационного воздействия можно аппроксимировать ломаной линией, которая делится точками перелома на три участка. Переломы указывают на смену ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности.

2. Продолжительность инкубационного периода можно оценивать по точке перелома, отделяющей участок *I* от участка *II*. Выявленная особенность, заключающаяся в линейном характере изменения высотного параметра шероховатости с течением времени в пределах инкубационного периода, может быть в дальнейшем использована для прогнозирования продолжительности инкубационного периода.

3. Для разработки методики прогнозирования необходимо провести комплекс экспериментов, чтобы выяснить как влияют условия изнашивания (в частности, интенсивность кавитационного воздействия и агрессивность водной среды) на положение точки перелома, отделяющей участок *I* зависимости $R_a(t)$ от участка *II*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванченко Н. Н.* Кавитационные разрушения в дизелях / Н. Н. Иванченко, А. А. Скуридин, М. Д. Никитин. — Л.: Машиностроение, 1970. — 152 с.

2. *Фомин В. В.* Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.

3. Погодаев Л. И. Эрозия в системах охлаждения дизелей / Л. И. Погодаев, А. П. Пимошенко, В. В. Капустин. — Калининград, 1993. — 325 с.

4. *Пимошенко А. П.* Защита судовых дизелей от кавитационных разрушений / А. П. Пимошенко. — Л.: Судостроение, 1983. — 120 с.

5. *Zhou Yu-K.* Cavitation erosion of diesel engine wet cylinder liners / Yu-K. Zhou, J.-G. He, F. G. Hammit // Wear. — 1982. — Vol. 76. — Is. 3. — Pp. 321–328. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90070-9.

6. *Zhou Yu-K.* Cavitation erosion of cast iron diesel engine liners / Yu-K. Zhou, J.-G. He, F. G. Hammit // Wear. — 1982. — Vol. 76. — Is. 3. — Pp. 329–335. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90071-0.

7. *Kim D.* Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine / D. Kim, J. Hwang, S. Han, C. Bae // Wear. — 2015. — Vol. 342–343. — Pp. 117–128. DOI:10.1016/j.wear.2015.06.021.

8. *Fontanesi S.* Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine / S. Fontanesi, M. Giacopini, G. Cicalese, S. Sissa, S. Fantoni // Engineering Failure Analysis. — 2014. — Vol. 44. — Pp. 408–423. DOI:10.1016/j.engfailanal. 2014.05.025.

9. *Пахомова Н. В.* Износ втулки цилиндра и её кавитационная стойкость / Н. В. Пахомова, А. В. Воробьёв // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 4. — С. 86–93.

10. *Цветков Ю. Н.* Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.

11. *Погодаев Л.И.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.

12. *Цветков* Ю. Н. Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 62–65.

13. *Гутман Э. М.* Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман. — М.: Металлургия, 1981. — 271 с.

USING THE MEASUREMENTS OF ROUGHNESS IN TESTING MATERIALS OF SHIP DIESEL CYLINDER LINERS FOR CAVITATION WEAR

The grey cast iron SCh24 and steel 38HM were tested for cavitation wear in fresh water in a 22 kHz vibratory cavitation apparatus. The mass of the samples and the roughness of their surface were measured periodically during testing. As a result, two kinds of dependences were plotted: mass losses vs. time and arithmetical mean deviation of the assessed profile vs. time. The graph of arithmetical mean deviation of the assessed profile against time turned out to be a broken line consisted of three sections. Juxtaposition of the above-mentioned dependences showed that the breakings correspond to the change of a leading process responsible for asperities formation on the surface. The breaking point between the first two sections can be used to estimate the incubation period of cavitation wear.

Keywords: ship diesel, cylinder liner, cavitation wear, surface roughness, incubation period of wear.

REFERENCES

1. Ivanchenko, Nikolay Nikolayevich, A. A. Skuridin, and M. D. Nikitin. *Kavitatsionnie razrusheniya v dizeliah*. L.: Mashinostroeniye, 1970.

2. Fomin, Viktor Vasilievich. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroeniye, 1977.

3. Pogodayev, Leongard Ivanovich, A. P. Pimoshenko, and V. V. Kapustin. *Eroziya v sistemah ohlazhdeniya dizeley*. Kaliningrad, 1993.

4. Pimoshenko, Aleksandr Petrovich. *Zashita sudovyh dizeley ot kavtatsionnyh razrusheniy*. L.: Sudostroyeniye, 1983.

5. Zhou, Yu-Kang, Jiu-Gen He, and F. G. Hammit. "Cavitation erosion of diesel engine wet cylinder liners." *Wear* 76.3 (1982): 321–328.

6. Zhou, Yu-Kang, Jiu-Gen He, and F. G. Hammit. "Cavitation erosion of cast iron diesel engine liners." *Wear* 76.3 (1982): 329–335. DOI:10.1016/0043-1648(82)90071-0.

7. Kim, Donghoon, J. Hwang, S. Han, and C. Bae. "Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine." *Wear* 342–343 (2015): 117–128. DOI:10.1016/j.wear.2015.06.021.

8. Fontanesi, S., M. Giacopini, G. Cicalese, S. Sissa, and S. Fantoni. "Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine." *Engineering Failure Analysis* 44 (2014): 408–423. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.05.025.

9. Pakhomova, N. V., and A. V. Vorobyov. "Wear of cylinder liner and its cavitation resistance." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2014): 86–93.

10. Tsvetkov, Yuriy Nikolayevich. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.

11. Pogodayev, Leongard Ivanovich, and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivniy i kavitatsionniy iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroeniye, 1984.

12. Tsvetkov, Yuriy Nikolayevich, and Evgeniy Olegovich Gorbachenko. "Estimation of Incubation Period at Cavitation Wear of Steel through Measuring Roughness." *Industrial Laboratory* 81.11 (2015): 62–65.

13. Gutman, Emmanuil Markovich. *Mehanohimiya metallov I zashita ot korrozii*. M.: Metallurgiya, 1981.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
yuritsvet@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru
Горбаченко Евгений Олегович — аспирант.
Научный руководитель:
Цветков Юрий Николаевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
jenyraqwerty@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
yuritsvet@mail.ru
Gorbachenko Yevgeniy Olegovich — postgraduate.
Supervisor:
Tsvetkov Yuriy Nikolayevich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
jenyraqwerty@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18 мая 2016 года

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-138-156
УДК 621.431.074

Е. И. Орлов,
А. П. Петров,
Г. Е. Живлюк

СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОТРАСЛИ СУДОВОГО, ТЕПЛОВОЗНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

В статье рассмотрено влияние двигателестроения на развитие различных областей промышленности, включая морской и речной транспорт. Отмечается, что реформирование экономики оказало существенное влияние на состояние стандартизации в этой области. Рассмотрены основные направления государственной, межгосударственной и международной стандартизации, дан анализ структуры действующих стандартов, указаны основные достижения в их создании с точки зрения учета интересов производителей и потребителей двигателей внутреннего сгорания. Учитывая современное состояние развития двигателестроения, предложены направления деятельности в области стандартизации двигателестроения, которые помогут улучшить безопасность, надежность, экологические и эксплуатационные характеристики двигателей и установок с дизельными двигателями различного назначения. Отмечается, что будущие успехи в этом направлении связаны с координацией усилий профильных и смежных организаций, работающих в отраслях, создающих судовые, наземные и иные установки с дизельными двигателями различного назначения.

Ключевые слова: развитие, двигателестроение, транспорт, судовые двигатели, морской транспорт, речной транспорт, дорожный транспорт, железнодорожный транспорт, электрические агрегаты, стандартизация, безопасность, окружающая среда, жизнедеятельность, инфраструктура, подтверждение соответствия.

Введение

Стандартизация и унификация продукции занимают важное место в развитии машиностроения. В течение последних десятилетий произошли такие существенные изменения в экономике страны, что это не могло не сказаться на состоянии стандартизации судового, тепловозного и промышленного двигателестроения. Этот исторический период был отмечен некоторыми вехами. Так, начиная с 1992 г., государственное управление стандартизацией в Российской Федерации, прежде осуществлявшееся Госстандартом СССР, было передано Государственному комитету Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (утв. Постановлением Правительства РФ от 25 декабря 1992 г. № 1020 Госстандарт России).

В 1992 г. главы правительств стран-участниц Союза независимых государств (СНГ) приняли Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации. В соответствии с этим Соглашением был создан Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, который разработал и утвердил Межгосударственную систему стандартизации (МСС). Эта система представляет собой комплекс взаимосвязанных, основополагающих стандартов, установивших цели и общие принципы межгосударственной стандартизации, а также основные направления работ и виды документов в этой области.

В 1993 г. был утвержден Закон РФ от 10 июня 1993 г. № 5154-I «О стандартизации» [1] (далее — закон РФ «О стандартизации»), установивший правовые основы стандартизации в Российской Федерации и принята Государственная система стандартизации Российской Федерации (ГСС РФ), а в 1994 г. утверждена новая редакция системы. ГСС РФ представляла собой комплекс взаимосвязанных основополагающих стандартов, регламентирующих общие организационно-технические правила проведения работ по стандартизации, порядок разработки и применения государственных стандартов, а также стандартов отраслей и предприятий. В частности, в законе РФ «О стандартизации» [1] указывалось, что «*Госстандарт России осуществляет контроль и надзор за соблюдением обязательных требований государственных стандартов*». Действовавшие в Рос-

сийской Федерации стандарты периодически обновлялись путем замены устаревших требований и гармонизации их с международными стандартами.

Была также изменена система технического нормирования России. Главным документом стандартизации стал вступивший с 1 июля 2003 г. в действие Федеральный закон (ФЗ) «О техническом регулировании» взамен закона РФ «О стандартизации». Основной ФЗ «О техническом регулировании» содержит положения и рекомендации международных организаций [2].

В настоящее время Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) входит в систему федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации и находится в ведении Министерства промышленности и торговли РФ. Оно образовано в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 20 мая 2004 г. № 649 «Вопросы структуры федеральных органов исполнительной власти». В Российской Федерации действует ГОСТ Р 1.0-2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения» [3], который устанавливает основные положения по организации и проведению в Российской Федерации работ в области стандартизации, цели и принципы стандартизации, требования к документам в области стандартизации, правила их опубликования, распространения и применения, а также задачи международного сотрудничества в области стандартизации. Вопросы создания и применения межгосударственных стандартов регламентированы ГОСТ 1.0-2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» [4], который устанавливает правила разработки и утверждения национальных стандартов Российской Федерации, проведения работ по их обновлению (путем внесения изменений, поправок или пересмотра), а также правила осуществления отмены действующих стандартов. Были также приняты Технические регламенты о безопасности объектов морского транспорта, о безопасности объектов внутреннего водного транспорта, о безопасности машин и оборудования [5] – [7].

Целью настоящей работы с учётом ранее изложенного является оценка состояния и перспектив стандартизации в области двигателестроения.

Роль двигателестроения в развитии промышленности

Отрасль отечественного двигателестроения, производящая двигатели судового, тепловозного, промышленного и специального назначения, имеет стратегическое значение для государства, поскольку определяет технический уровень конечных изделий водного и железнодорожного транспорта, а также других объектов гражданской и военной инфраструктуры. Двигателестроение занимает важное место в экономике промышленно развитых стран и развивается, как свидетельствуют материалы 26- и 27-го конгрессов [8], [9] CIMAC (Международный комитет по двигателям внутреннего сгорания), основываясь на стремлении как можно полнее соответствовать действующему законодательству в ограничении выбросов вредных веществ и загрязнении окружающей среды, но в то же время удовлетворять потребности рынка при снижении потребления топлива и расширении диапазона мощностей двигателей. Поэтому доминирующими направлениями развития двигателестроения являются снижение выбросов вредных веществ при одновременном повышении эффективности использования топлива. В России двигателестроение, начиная с 90-х гг. XX в., находится в условиях кризиса, последовавшего после приватизации дизелестроительных заводов, научных и проектных организаций, а также упадка их деятельности (причинами кризиса являются переход к рыночным условиям хозяйствования и потеря финансово обоснованных ориентиров отрасли) [10]. Принятая в 2011 г. Концепция подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011 – 2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007 – 2011 годы» [11] в незначительной степени исправляет положение дел, а с учетом необходимости импортозамещения деталей, узлов и конструкций и вовсе представляется малопродуктивной [12].

Состояние и перспективы стандартизации в области двигателестроения

Положение в отечественной отрасли двигателестроения не могло не сказаться на состоянии стандартизации. В результате падения промышленного производства в стране в последние годы сокращается разработка новых технических стандартов, инициируемых государством и отечественными производителями [13]. Стандарты, определяющие технический уровень, классификацию продукции и терминологию, а также взаимодействие родственных предприятий, стали невостребованными для отечественных производителей. Практически деятельность по стандартизации в части двигателестроения свелась к актуализации небольшой группы стандартов (общие требования безопасности, выбросы вредных веществ с отработавшими газами, дымность отработавших газов, требования пожарной безопасности, методы измерения и оценки воздушного шума), предназначенных для обязательного подтверждения соответствия.

В целях реализации Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и в соответствии с Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 ноября 2007 года № 3267 «О создании Технического комитета по стандартизации «Двигатели внутреннего сгорания поршневые»» создан ТК 235 «Дизели судовые, тепловозные и промышленные». ТК 235 стал правопреемником Технического комитета с тем же номером, существовавшим ранее. За ТК 235 закреплена продукция в соответствии с кодами Общероссийского классификатора продукции — ОКП 31 2000, и функции постоянно действующего национального рабочего органа МТК 235 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые». ТК 235 представляет национальный орган по стандартизации в МТК 235 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые» и ИСО / ТК 70 «Двигатели внутреннего сгорания» по согласованию. Утверждены структура и перечень организаций-членов ТК «Двигатели внутреннего сгорания поршневые» по стандартизации — ТК 235 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые». Приказом агентства также утверждены структура (табл. 1) и перечень организаций-членов ТК «Двигатели внутреннего сгорания поршневые» — ТК 235 (табл. 2).

Таблица 1

Структура ТК «Двигатели внутреннего сгорания поршневые»

Наименование ТК (ПК)	Организация, на базе которой создан ТК (ПК), адрес, телефон	Соответствие ТК ИСО	Специализация ТК по виду продукции, коды ОКП, область деятельности
ТК «Двигатели внутреннего сгорания поршневые»	Общество с ограниченной ответственностью «Центральный научно-исследовательский дизельный институт» (ООО «ЦНИДИ») Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25 Тел.: (812) 371-65-81 Тел./факс: (812) 371-22-73 E-mail: DIESEL@CNIDI.RU *Председатель* — Власов Леонид Игоревич *Ответственный секретарь* — Орлов Евгений Иванович	ИСО/ТК 70 «Двигатели внутреннего сгорания» TC 70 Internal combustion engines	Стандартизация требований в области судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. ОКП 31200 «Дизели и дизель-генераторы». ОКС 27.020 «Двигатели внутреннего сгорания».

Таблица 2

Перечень организаций-членов ТК 235 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые

№ п/п.	Наименование
1	2
1	ООО «ЦНИДИ»
2	ФГУП «ВНИИНМАШ»
3	ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова» (ныне ФГУП «Крыловский государственный научный центр»)

Таблица 2
(*Окончание*)

4	ЗАО «ЦНИИМФ»
5	ФГУП «Гипрорыбфлот» (ныне ОАО «Гипрорыбфлот»)
6	Российский морской регистр судоходства
7	Российский речной регистр
8	ФГУП «ВНИКТИ» (ныне ФГУП «ВНИКТИ МПС РОССИИ»)
9	ФГУП «ВНИИЖТ»
10	Государственный университет водных коммуникаций (ныне ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»)
11	ФГУП «НАМИ»
12	ОАО «НИИЭлектроагрегат»
13	ЗАО «Трансмашхолдинг»
14	Группа «ГАЗ», дивизион «Двигатели»
15	ОАО ХК «Коломенский завод»
16	ОАО ХК «Барнаултрансмаш»
17	ОАО «Волжский дизель имени Маминых»
18	ОАО «РУМО»
19	ОАО «Звезда»
20	ОАО УК «Брянский машиностроительный завод»
21	ОАО «Пензадизельмаш»
22	ООО «Уральский дизель-моторный завод»
23	ОАО «Автодизель»
24	ОАО НТЦ «КАМАЗ»
25	Санкт-Петербургский научный центр РАН

В сложившихся условиях Центральному научно-исследовательскому дизельному институту (ЦНИДИ) в качестве ведущей организации по стандартизации в двигателестроении в рамках ТК 235 важно было проявить инициативу в поиске реальных направлений развития стандартизации соответствующей тематики. Структура стандартов, подведомственных ТК «Двигатели внутреннего сгорания поршневые», включает межгосударственные (для стран СНГ), государственные и международные стандарты (МС) — ISO (International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации — ИСО), разработанные ТК 235 по инициативе и при непосредственном участии ЦНИДИ за более чем столетнюю историю его существования. Их распределение показано на рис. 1 и 2.

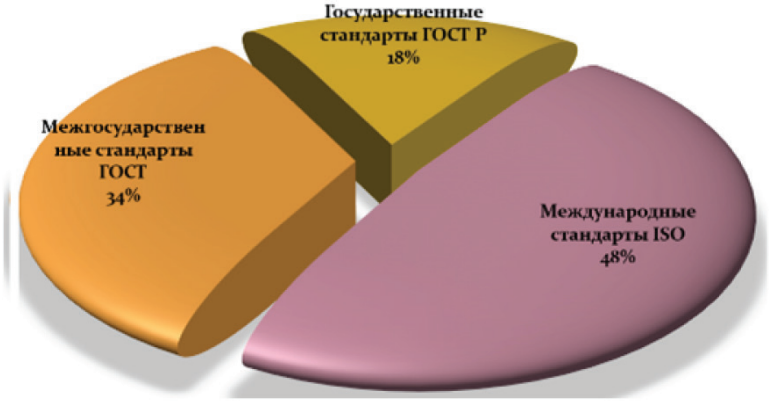


Рис. 1. Структура стандартов в области двигателестроения

а) б)

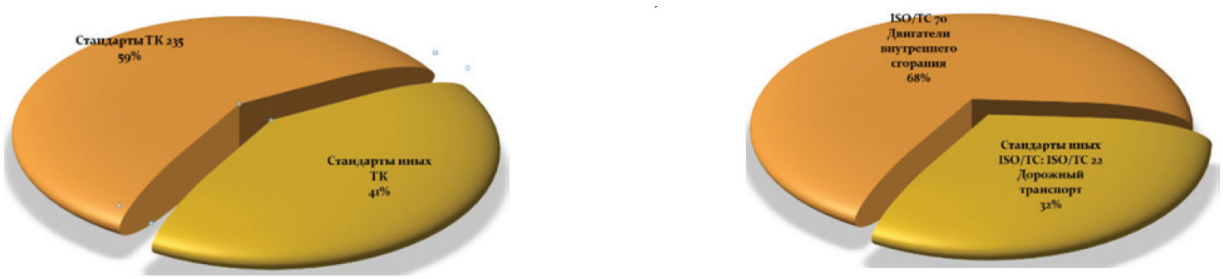


Рис. 2. Распределение стандартов между ТК (*а*) и между ИСО/ТК (*б*)

Важно было также исключить возможные пересечения выбранных направлений с деятельностью ТК 056 «Дорожный транспорт» и ТК 047 «Передвижные электростанции» и в то же время обеспечить необходимое с ними взаимодействие. Непременным принципом деятельности ТК 235 над собственными разработками всегда был принцип гармонизации с перспективными разработками международных и региональных школ стандартизации при разумном учете основных операторов на рынке.

В табл. 3 – 5 приведены стандарты, разработанные или представленные в обновленных редакциях ТК 235 и других ТК за 24 года — с 1991 по 2015 гг. (по состоянию на 01.12.2015 г.). Межгосударственные стандарты (ГОСТ) распространяются на продукцию двигателестроения стран СНГ. Следует обратить внимание на новые редакции стандартов, которые учитывают требования МС (табл. 3).

Таблица 3

Межгосударственные стандарты в области двигателестроения

Номер стандарта	Наименование стандарта
1	2
ГОСТ 4.367-85	Система показателей качества продукции. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Номенклатура показателей.
ГОСТ 4.409-85	Система показателей качества продукции. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Номенклатура показателей.
ГОСТ 17.2.2.02-98	Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.
ГОСТ 621-87	Кольца поршневые двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия.
ГОСТ 2402-82	Агрегаты сварочные с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия.
ГОСТ 8002-74	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Воздухоочистители. Методы стендовых безмоторных испытаний.
ГОСТ ISO 8178-1-2013	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах.
ГОСТ ISO 8178-2-2013	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 2. Измерение выбросов газов и частиц в условиях эксплуатации.
ГОСТ ISO 8178-3	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 3. Определение и методы измерения дымности отработавших газов на установившихся режимах.

Таблица 3
(*Продолжение*)

ГОСТ ISO 8178-4-2013	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах.
ГОСТ ISO 8178-9	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 9. Испытательные циклы и методы стендовых измерений дымности отработавших газов на переходных режимах (В настоящее время разработана и представлена окончательная редакция проекта стандарта на утверждение).
ГОСТ ISO 8178-10	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 10. Испытательные циклы и методы измерений дымности отработавших газов в условиях эксплуатации на переходных режимах.
ГОСТ ISO 8178-11	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 11. Стендовые измерения выбросов отработавших газов и частиц из двигателей внедорожных транспортных средств в неустановившемся режиме.
ГОСТ 8519-93	Топливопроводы высокого давления дизелей и их соединения. Общие технические условия.
ГОСТ ISO 8528-3-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 3. Генераторы переменного тока.
ГОСТ ISO 8528-4-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 4. Устройства управления и аппаратура коммутационная.
ГОСТ ISO 8528-5-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 5. Электроагрегаты
ГОСТ ISO 8528-6-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 6. Методы испытаний.
ГОСТ ISO 8528-8-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 8. Электроагрегаты малой мощности. Технические требования и методы испытаний.
ГОСТ ISO 8528-12-2011	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 12. Аварийные источники питания для служб обеспечения безопасности.
ГОСТ 10150-2014	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия.
ГОСТ 10448-2014	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний
ГОСТ 111О2-75	Приборы и устройства приемные и исполнительные дизельной автоматики. Типы, основные параметры и технические требования.
ГОСТ 11729-78	Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Воздухоочистители. Общие технические условия.
ГОСТ 11928-83	Системы аварийно-предупредительной сигнализации и защиты автоматизированных дизелей и газовых двигателей. Общие технические условия.
ГОСТ 13211-8О	Охладители кожухотрубчатые водомасляные и водоводяные дизелей и газовых двигателей. Общие технические условия.
ГОСТ 15О59-88	Форсунки автотракторных дизелей. Габаритные и присоединительные размеры.
ГОСТ 15О6О-95	Дизели автотракторные. Насосы топливные высокого давления. Габаритные и присоединительные размеры.
ГОСТ 15829-89	Насосы топливоподкачивающие поршневые дизелей. Общие технические условия.
ГОСТ 185О9-88	Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний.

Таблица 3
(*Окончание*)

ГОСТ 2ОООО-88	Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия.
ГОСТ 2О375-83	Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Термины и определения.
ГОСТ 22836-77	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Направление вращения.
ГОСТ 22858-77	Двигатели автотракторные. Элементы сменные фильтров тонкой очистки масла. Основные размеры.
ГОСТ 23162-78	Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Система условных обозначений.
ГОСТ 23377-84	Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования.
ГОСТ 2355О-79	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Обозначение и нумерация цилиндров.
ГОСТ 24028-2013	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения.
ГОСТ 25959-83	Дизели тракторные и комбайновые. Приемка.
ГОСТ 2816О-89	Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Насосы для систем охлаждения. Метод расчета подачи.
ГОСТ 30574-98	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов. Циклы испытаний.
ГОСТ 30575-98	Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Методы измерения и оценки воздушного шума.
ГОСТ 31340-2012	Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний.
ГОСТ 31349-2007 (ИСО 8528-9:1995)	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния.
ГОСТ 31440.1-2011 (EN 1834-1:2000)	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Требования безопасности к двигателям, предназначенным для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 1. Двигатели группы II для применения в средах, содержащих горючий газ и пар.
ГОСТ 31440.2-2011 (EN 1834-2:2000)	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Требования безопасности к двигателям, предназначенным для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 2. Двигатели группы I для применения в подземных выработках, опасных по воспламенению рудничного газа и / или горючей пыли.
ГОСТ 31440.3-2011 (EN 1834-3:2000)	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Требования безопасности к двигателям, предназначенным для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 3. Двигатели группы I для применения в подземных выработках, опасных по воспламенению рудничного газа и / или горючей пыли.
ГОСТ 31540-2012	Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний
ГОСТ 31966-2012	Двигатели судовые, тепловозные и промышленные. Общие требования безопасности.
ГОСТ 31967-2012	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения.

Государственные (национальные) стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р) создавались, начиная с 1991 г., и с тех пор распространяются исключительно на продукцию двигателестроения РФ (табл. 4).

Таблица 4

Государственные стандарты в области двигателестроения

Номер стандарта	Наименование стандарта
1	2
ГОСТ Р 17.2.2.07-2000	Охрана природы. Атмосфера. Поршневые двигатели внутреннего сгорания для малогабаритных тракторов и средств малой механизации. Нормы и методы измерения выбросов вредных веществ с отработавшими газами и дымности отработавших газов.
ГОСТ Р ИСО 3046-5-2004	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 5. Крутильные колебания.
ГОСТ Р ИСО 3046-6-99	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 6. Защита от превышения частоты вращения.
ГОСТ Р ИСО 4548-1-2009	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров двигателей внутреннего сгорания. Часть 1. Зависимость перепада давления от расхода.
ГОСТ Р ИСО 4548-3-2009	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров двигателей внутреннего сгорания. Часть 3. Стойкость к высоким перепадам давления и повышенным температурам.
ГОСТ Р ИСО 8178-5-2009	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов вредных веществ. Часть 5. Топливо для испытаний.
ГОСТ Р ИСО 8178-7-99	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов вредных веществ. Часть 7. Определение семейства двигателей.
ГОСТ Р ИСО 8178-8-99	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов вредных веществ. Часть 8. Определение группы двигателей.
ГОСТ Р ИСО 8528-2-2007	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 2. Двигатели внутреннего сгорания.
ГОСТ Р ИСО 8528-7-2007	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 7. Технические данные для описания и расчета.
ГОСТ Р 5О783-95	Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования.
ГОСТ Р 51998-2002	Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия.
ГОСТ Р 52408-2005 (ИСО 8178-2:1996)	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Часть 2. Измерения в условиях эксплуатации (MOD).
ГОСТ Р 52517-2005 (ИСО 3046-1:2002)	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного масла. Методы испытаний (MOD).
ГОСТ Р 52914-2008	Двигатели тракторные и комбайновые. Виброакустические показатели и методы испытаний.
ГОСТ Р 53174-2008	Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия.
ГОСТ Р 53176-2008	Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Показатели надежности. Требования и методы испытаний.
ГОСТ Р 53178-2008	Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний.
ГОСТ Р 53987-2010 (ИСО 8528-:1:2005)	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, технические характеристики и параметры.
ГОСТ Р 53986-2010 (ИСО 8528-3:2005)	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 3. Генераторы переменного тока.

Таблица 4
(*Окончание*)

ГОСТ Р 53988-2010 (ИСО 8528-:4:2005)	Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 4.Устройства управления и аппаратура коммутационная.
ГОСТ Р 54812-2011	Дизель-генераторы судовые вспомогательные и аварийные. Типы и основные параметры. Общие технические требования.
ГОСТ Р 55230-2012	Двигатели судовые, тепловозные и промышленные. Требования пожарной безопасности.
ГОСТ Р 55231-2012	Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия.
ГОСТ Р 55437-2013	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Классификация по объему автоматизации и технические требования к автоматизации.
ГОСТ Р 55760-2013	Установки электрогенераторные с приводом от двигателей внутреннего сгорания. Правила маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.
ГОСТ Р ЕН 1834-1-2010	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Требования безопасности к двигателям, предназначенным для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 1. Двигатели Группы II для применения в средах, содержащих горючий газ и пар.
ГОСТ Р ЕН 1834-2-2010	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Требования безопасности к двигателям, предназначенным для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 2. Двигатели Группы I для применения в подземных выработках, опасных по воспламенению рудничного газа и/или горючей пыли.

Членство России во Всемирной торговой организации (ВТО) предопределяет участие в международной стандартизации, а международные стандарты ИСО определяют динамику и темпы развития, конкурентоспособность продукции двигателестроения на мировом рынке (табл. 5).

Таблица 5

Международные стандарты в области двигателестроения

Номер стандарта	Наименование стандарта
1	2
ISO 12O4:199O	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Определение направления вращения. Обозначение и нумерация цилиндров и клапанов в крышках цилиндров. Определение правостороннего и левостороннего однорядного двигателя и определение сторон двигателя.
ISO 1585:1992	Транспорт дорожный. Правила испытания двигателей. Мощность нетто.
ISO 2534:1998	Транспорт дорожный. Руководство по испытанию двигателей. Полная мощность.
ISO 2699:1994	Двигатели дизельные. Топливные форсунки размера S с фланцевым креплением. Типы 2, 3, 4, 5 и 6.
ISO 2261-2014	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Механизмы ручного управления. Стандартное направление движения.
ISO 2710-1-2000	Поршневые двигатели внутреннего сгорания Словарь. Часть 1. Термины конструктивного и эксплуатационного характера.
ISO 2710-2-2011	Поршневые двигатели внутреннего сгорания Словарь. Часть 2. Термины по техническому обслуживанию двигателей.
ISO 3046-1-2014	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 1. Определение мощности, расхода топлива и смазочного масла, и методы испытания. Дополнительные требования к двигателям общего назначения.

Таблица 5
(*Продолжение*)

ISO 3046-3:2014	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 3. Методы измерения.
ISO 3046-4:2015	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 4. Регулирование скорости.
ISO 3046-5-2015	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 5. Крутильные колебания.
ISO 3046-6:2011	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Эксплуатационные характеристики. Часть 6. Защита от разноса.
ISO 29464:2011	Оборудование для очистки воздуха или других газов. Терминология
ISO 4OO8	Транспорт дорожный. Испытания топливных насосов.
ISO 4008-1:198O	Транспорт дорожный. Испытания топливных насосов. Часть 1. Динамические условия.
ISO 4008-2:1983	Транспорт дорожный. Испытания топливных насосов. Часть 2. Статические условия.
ISO 4008-3:1987	Транспорт дорожный. Испытания топливных насосов. Часть 3. Применение и методы испытаний.
ISO 4020::2001	Транспорт дорожный. Топливные фильтры для дизельных двигателей. Методы испытаний.
ISO 4113:1988	Транспорт дорожный. Калибровочная жидкость для устройств для впрыска топлива для дизелей.
ISO 4548	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания.
ISO 4548-1:1997	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 1. Зависимость перепада давления от расхода.
ISO 4548-2:1997	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 2. Характеристики перепускного клапана.
ISO 4548-3:1997	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 3. Стойкость к высоким перепадам о давления и повышенным температурам.
ISO 4548-4:1997	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 4. Начальная эффективность задержания частиц, срок службы и совокупная эффективность (гравиметрический метод).
ISO 4548-5:2013	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 5.Испытание в условиях, имитирующих пуск холодного двигателя и гидравлические испытания на длительность импульса.
ISO 4548-6:2012	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 6. Испытание по определению статического давления разрыва.
ISO 4548-7:2012	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 7. Вибрационные испытания на усталость
ISO 4548-9:2008	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 9. Испытания впускных и выпускных противосливных клапанов.
ISO 4548-11:1997	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 11. Самоочищающиеся фильтры.
ISO 4548-12:2000	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 12. Определение эффективности фильтрации путем подсчета удержанных частиц и грязеемкости.

Таблица 5
(*Продолжение*)

ISO 4548-13:2013	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 13. Испытание на разрыв статическим давлением корпуса фильтра из композитного материала.
ISO 4548-15:2014	Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров для двигателей внутреннего сгорания. Часть 15. Испытание на усталость при вибрации корпуса фильтра из композитного материала.
ISO 5O11:2000	Воздухоочистители, устанавливаемые на входе в двигатели внутреннего сгорания, и компрессоры. Эксплуатационные испытания
ISO 6415:2005	Двигатели внутреннего сгорания. Центробежные масляные фильтры. Размеры.
ISO 6518	Транспорт дорожный. Системы зажигания.
ISO 6518-1:2002	Транспорт дорожный. Системы зажигания. Часть 1. Словарь.
ISO 6798:1995	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение распространяющегося по воздуху шума. Технический и контрольный методы.
ISO 6826:1997	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Пожарная защита.
ISO 7612:2006	Двигатели дизельные. Топливные рядные насосы, устанавливаемые на опорной плите, и питающие насосы высокого давления для общих рельсовых топливных систем. Установочные размеры.
ISO 7967	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам.
ISO 7967-1:2005	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 1. Детали остова.
ISO 7967-2:2010	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 2. Основные детали ходовой часть.
ISO 7967-3:2010	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 3. Клапаны, привод кулачкового вала и клапанный механизм.
ISO 7967-4:2005	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 4. Системы наддува и газообмена.
ISO 7967-5:2010	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 5. Системы охлаждения.
ISO 7967-6:2005	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 6. Системы смазки.
ISO 7967-7:2005	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 7. Системы регулирования.
ISO 7967-8:2005	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Словарь по компонентам и системам. Часть 8. Системы пуска.
ISO 8178	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания
ISO 8178-1:2006	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах испытаниях.
ISO 8178-2:2008	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 2. Измерение выбросов газов и частиц в эксплуатации.
ISO 8178-3:1994	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 3. Определение и методы измерения характеристик выхлопных газов в стационарных условиях.

Таблица 5
(*Продолжение*)

ISO 8178-4:2007	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для различных режимов работы двигателей.
ISO 8178-5:2008	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 5. Топливо для испытаний.
ISO 8178-6:2000	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 6. Отчет о результатах измерения и испытания.
ISO 8178-7:1996	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 7. Определение семейства двигателей.
ISO 8178-8:1996	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 8. Определение групп двигателей.
ISO 8178-9:2012	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 9. Циклы и методики испытаний для стендовых измерений дымовыделения отработавших газов от двигателей внутреннего сгорания в неустановившемся режиме.
ISO 8178-10:2002	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 10. Циклы и методики испытаний для измерений в полевых условиях дымовыделения отработавших газов от двигателей внутреннего сгорания в неустановившемся режиме.
ISO 8178-11:2002	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выбросов продуктов сгорания. Часть 11. Стендовые измерения выбросов примесных газов и твердых частиц из двигателей, стоящих на внедорожниках, в неустановившихся условиях испытаний.
ISO 8528	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания.
ISO 8528-1:2005	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, номинальные характеристики и режимы работы.
ISO 8528-2-2005	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 2. Двигатели.
ISO 8528-3:2005	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 3. Генераторы переменного тока для генераторных агрегатов.
ISO 8528-4:2005	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 4. Аппаратура управления и коммутационная аппаратура.
ISO 8528-5:2013	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 5. Генераторные агрегаты.
ISO 8528-6:2005	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 6. Методы испытаний.
ISO 8528-7:1994	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 7. Технические данные для описания и расчета.
ISO 8528-8:1995	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 8. Требования и испытания для маломощных генераторных агрегатов.
ISO 8528-9:1995	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 9. Измерение и оценка механических вибраций.

Таблица 5
(*Окончание*)

ISO 8528-10:1998	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 10. Измерение воздушного шума методом огибающей поверхности.
ISO 8528-12:1997	Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 12. Аварийные источники питания для служб обеспечения безопасности.
ISO 8665:2006	Суда малые. Судовые главные гребные двигатели и системы. Измерение мощности и заявленные значения.
ISO 8984	Двигатели дизельные. Испытания топливных форсунок.
ISO 8984-1:1993	Двигатели дизельные. Испытания топливных форсунок. Часть 1. Стенд с ручным приводом для испытания и регулировки.
ISO 8984-2:1993	Двигатели дизельные. Испытания топливных форсунок. Часть 2. Методы испытаний.
ISO 8999:2001	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Графические условные обозначения
ISO 9249:2007	Машины землеройные. Свод правил по испытанию двигателей. Полезная мощность.
ISO 15550:2002	Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Определение и метод измерения мощности двигателя. Общие требования.
ISO 15619:2013	Возвратно-поступательные двигатели внутреннего сгорания. Метод измерения глушителей выхлопа. Измерение уровня звуковой мощности выхлопного шума и вносимого затухания и соотношения звукового давления и потери мощности.
ISO 21006:2006	Двигатели внутреннего сгорания. Заявление веса (массы) двигателя.

Следует отметить, что стандарты разрабатывались ТК 235 исходя из актуальности темы как отклик на возникшую проблему. Например, ГОСТ 10150-2014 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия» был изменен для того, чтобы установить в одном документе стандартные исходные условия и методы объявления мощности, расходов топлива и масла, способы их пересчета, сформулировать понятия о мощности двигателя применительно к различным условиям ее идентификации и т.д. ГОСТ/ИСО 8178 явился откликом на современные и перспективные нормы выбросов вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду международных организаций и сформировал нормативную базу методов измерений. Государственные стандарты по автоматизации двигателей были призваны создать нормативно-техническое обеспечение формировавшихся в рамках унификации продукции производств систем, приборов и средств дизельной автоматики.

ТК 235 принимал активное участие в деятельности ИСО, в том числе в области разработки международных стандартов по ДВС. Практически разработка международных стандартов по поршневым ДВС велась в рамках нескольких ТК ИСО: ТК 22 «Дорожный транспорт», ТК 23 «Тракторы и машины для сельского и лесного хозяйства», ТК 127 «Землеройные машины» и ТК 70 «Двигатели внутреннего сгорания».

Технический комитет ТК 70 существует с 1949 г. и разрабатывает международные стандарты для поршневых ДВС, используемых на судах, железнодорожном транспорте, в буровой технике, различного рода стационарных установках и в других областях, не подпадающих под эгиду ранее указанных четырех комитетов, а также для газовых турбин. В начальный период своей деятельности эти технические комитеты работали независимо друг от друга, зачастую занимаясь параллельной разработкой аналогичных документов, а затем активно сотрудничали, имея целью осуществить возможную унификацию разрабатываемых документов или создание единых международных стандартов. Так, еще в 1978 г. на специальном заседании секретариатов технических

комитетов ИСО: ТК 22, ТК 23, ТК 110, ТК 127 и ТК 70, была образована специальная консультативная группа, призванная координировать работу заинтересованных технических комитетов и намечены основные направления совместных работ по максимальному сближению документов, разрабатываемых техническими комитетами.

В настоящее время технический комитет ТК 70 имеет тесные контакты с рядом других специализированных технических комитетов ИСО: ТК 43 «Акустика», ТК 108 «Вибрация и механические удары» и др., а также с такими международными организациями, как Международный электротехнический комитет (МЭК), Международная ассоциация классификационных обществ (МАКО), Международный конгресс двигателей (СИМАК), Международный союз железных дорог, Европейская экономическая комиссия при ООН — (ЕЭК) и др. Так или иначе, с участием ТК 70 разработаны свыше 69 стандартов. Свыше двадцати МС по двигателям внутреннего сгорания подготовлены ТК 235 и приняты непосредственно в Российской Федерации, многие учтены при разработке и актуализации российских и межгосударственных стандартов [11]. В значительной мере суть МС ИСО 1204, ИСО 2710, ИСО 3046/1 нашла отражение в межгосударственных стандартах ГОСТ 22836 в части определения направления вращения, ГОСТ 23550 в части нумерации цилиндров, ГОСТ 10150-2014 и национальных стандартах: ГОСТ Р 52517-2005 (ИСО 3046-1:2002) «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Часть 1. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного масла. Методы испытаний», ГОСТ Р 53638-2009 (ИСО 3046-1:2002, ИСО 15550:2002) «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия». В данном документе установлены следующие стандартные условия, при которых определяются мощность и расход топлива:

– полное атмосферное давление p_r = 100 кПа (750 мм рт. ст.);

– температура воздуха T_r = 298 К (t_r = 25 °С);

– температура охлаждающей среды на входе в охладитель наддувочного воздуха T_{cr} = 298 К (t_{cr} = 25 °С);

– относительная влажность φ_r = 30 % и т. д., а также приведены понятия о мощности двигателя применительно к различным условиям ее идентификации; даны понятия индикаторной, тормозной (эффективной) и полезной тормозной мощности, длительной мощности, мощности перегрузки и мощности на упоре рейки, мощности ИСО и стандартной мощности ИСО; установлены коды мощностей; приводятся перечни вспомогательного оборудования, которые должны указываться при любом объявлении мощности, причем это вспомогательное оборудование объединено в три группы.

Весьма важное значение имеет также межгосударственный стандарт ГОСТ 10448-2014 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний» и соответствующий ему национальный стандарт ГОСТ Р 53639-2009 (ИСО 3046-3:2006, ИСО 15550:2002) «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний». В этих нормативных документах регламентируются виды испытаний двигателей, проводимых в процессе их производства (приемо-сдаточные, периодические и специальные), методы и условия их проведения, а также объемы и точность проводимых измерений, уточнены объемы испытаний пересматриваются методы пересчета мощности и т. д.

Важнейшим достижением явилась разработка комплекса стандартов на базе стандартов ISO 8178, включающая методы измерений выбросов вредных веществ с отработавшими газами при испытаниях на испытательных стендах испытаниях, в эксплуатации, в стационарных условиях, испытательные циклы и методы измерения дымности отработавших газов. Испытательные циклы нормированы для различных режимов работы двигателей (топливо — для испытаний), а также приведены отчеты о результатах измерения и испытания, дано определение семейства и групп двигателей.

Например:

ГОСТ ISO 8178-1-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 1. Измерение выбросов газов и частиц на испытательных стендах».

ГОСТ ISO 8178-2-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 2. Измерение выбросов газов и частиц в условиях эксплуатации».

ГОСТ ISO 8178-3-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 3. Определение и методы измерения дымности отработавших газов на установившихся режимах» и др.

Эти же стандарты утверждены в качестве национальных ГОСТ Р ИСО 8178, дополненных следующими стандартами:

ГОСТ Р ИСО 8178-7-99 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Часть 7. Определение семейства двигателей».

ГОСТ Р ИСО 8178-8-99 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Часть 8. Определение группы двигателей».

Значительной также является группа стандартов, регламентирующих требования к автоматизации двигателей:

ГОСТ Р 55437-2013, устанавливающий классификацию по объему автоматизации и технические требования к автоматизации; действует взамен отмененного ГОСТ 14228-80.

С 2012 г. действует ГОСТ Р 55231-2012 (взамен отмененного ГОСТ 10511-83) регламентирует классификацию систем автоматического регулирования частоты вращения и требования к ним; классификация основана на выборе регулируемых скоростных режимов (однорежимные, многорежимные и всережимные) и на точности регулирования для однорежимных и всережимных систем. Для каждого класса точности устанавливаются параметры систем регулирования, параметры настройки, параметры установившегося режима, параметры неустановившегося режима и показатели параллельной работы двигателей; предложена формула для расчета степени рассогласования нагрузки при параллельной работе дизелей.

ГОСТ 11102-75, ГОСТ 11729-78, ГОСТ 11928-83, устанавливающие требования к приборам и устройствам автоматики, системам аварийно-предупредительной сигнализации и дистанционного автоматизированного управления.

К перспективным направлениям стандартизации в двигателестроении относятся:

– разработка стандартов, закрывающих возникающие пробелы в нормативной базе с точки зрения надежности и безопасности в результате появления интеллектуальных объектов на основе применения новой организации рабочих процессов в двигателях и сопутствующего этому применения новых программных и технических средств управления;

– использование современных достижений в области энергосбережения с точки зрения их влияния на энергетическую эффективность энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания;

– разработка стандартов на объекты, не попавшие ранее в сферу интересов двигателестроителей и возможные к разработке только при их участии.

В настоящее время одним из реальных объектов стандартизации являются лодочные моторы судов в части классификации, районов и условий эксплуатации маломерных судов, норм вредных выбросов, создания зон контроля выбросов типа ECA (Emission Control Area), подведомственные ГИМС — Госинспекции по маломерным судам [15] – [18]. Лодочные моторы мощностью 3,7 кВт (5 л. с.) и выше должны соответствовать ГОСТ 28556-90 «Моторы лодочные подвесные. Типы. Основные параметры. Общие технические требования» [19], [20], подготовленному специалистами автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения. Учитывая существенный рост потребления судов с лодочными моторами, возникает необходимость пересмотра стандарта, насчитывающего четвертьвековую историю. По нашему мнению, изменения должны касаться их классификации, определения мощностей двигателей, стандартных исходных условий окружающей среды при заявлении мощности, норм выбросов вредных веществ с отработавшими газами, методов испытаний, приспособленности к автоматизации, средств аварийной защиты и т. д. Нормирование современных требований к лодочным моторам с учетом специфических особенностей их применения и эксплуатации, а также их воздействия на безопасность плавания и окружающую среду в полной мере может быть обеспечено лишь их производителями и специалистами. Полага-

ем, что ТК 235, располагающий достаточным опытом, в состоянии при финансировании заинтересованными организациями возглавить это направление.

Следует отметить, что требуют пересмотра стандарты на дизельное и моторное топливо. С 31 декабря 2012 г. вступил в силу Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту», утвержденный решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 826 [21]. Прил. 2 и 6 к Техническому регламенту вводят ограничение на выпуск топлива. С 2016 г. ограничен срок выпуска в оборот автомобильного бензина и дизельного топлива классов 2 – 4, а выпуск в оборот автомобильного бензина и дизельного топлива класса 5 без ограничений. Выпуск судового топлива с регламентируемым содержанием массовой доли серы с 1 января 2013 г. ограничивается показателем не более 1,5 % при температуре вспышки в закрытом тигле не ниже 61 °С.

Выводы

1. Следует отметить, что сохраняющийся статус ЦНИДИ как отраслевого института в стандартизации двигателестроения обеспечивает существенные возможности для проявления инициатив в принципиально новых перспективных направлениях развития двигателестроения на основе координации деятельности членов ТК 235.

2. Широкий спектр технических комитетов в смежных крупных секторах, таких, как, например, морской, речной и дорожный транспорт, способен выработать общие принципы и пути формулирования нормативных требований эффективности и безопасности установок с применением двигателей различных типов.

3. Развитие отечественной стандартизации, как и двигателестроения, не может происходить вне деятельности международных организаций. Дальнейшая гармонизация отечественных и международных стандартов является важнейшим направлением совершенствования стандартизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон РФ от 10 июня 1993 г. № 5154-I «О стандартизации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gosthelp.ru/text/Zakon51541Ostandartizacii.html (дата обращения: 10.10.2014).

2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rg.ru/2002/12/27/tehreglament-dok.html (дата обращения: 15.02.2016).

3. ГОСТ Р 1.0-2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_%D0%A0_1.0-2012 (дата обращения: 22.12.2015).

4. ГОСТ 1.0-2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1.0-2015 (дата обращения: 22.01.2016).

5. Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта (утв. Постановлением Правительства РФ от 12 августа 2010 г. № 620). — 79 с.

6. Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта (утв. Постановлением Правительства РФ от12 августа 2010 г. № 623). — 129 с.

7. Технический регламент о безопасности машин и оборудования (утв. Постановлением Правительства РФ от 15 сентября 2009 г. № 753). — 29 с.

8. Ship&Offshore/Schiff&Hafen. — 2010. — № 3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.ihr-emagazin.de/eMags/emags_online_demo/ship_2010/index.html#37 (дата обращения: 15.09.2013).

9. Ship&Offshore/Schiff&Hafen [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf (дата обращения: 15.09.2013).

10. Итоги и решение Всероссийской научно-технической конференции «Развитие двигателестроения в России» // Двигателестроение. — 2009. — № 2. — С. 3–7.

11. Концепция подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007 – 2011 годы // Двигателестроение. — 2011. — № 2. — С. 3–11.

12. *Нерсесян Л.* Военно-морской флот России: импортозамещение и конкуренция. Международный военно-морской салон МВМС-2015 [Электронный ресурс] / Л. Нерсесян. — Режим доступа: http://regnum.ru/news/polit/1939844.html (дата обращения: 07.01.2016).

13. *Куликов А. В.* Деятельность ВНИИНМАШ по стандартизации в области автотранспорта. Итоги работы за последние 10 лет и перспективы / А. В. Куликов // Вестник ВНИИНМАШ. — 2013. — № 1 (14). — С. 53–59.

14. *Петров А. П.* Гармонизация отечественных и международных стандартов в области двигателей внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2016. — С. 244–258.

15. Федеральный закон от 23 апреля 2012 г. № 36-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части определения понятия маломерного судна» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ivo.garant.ru/#/document/70165836:0 (дата обращения: 15.03.2016).

16. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gims.ru/zakon/zakon_19990430_81FZ_Kodeks_Trade_More.htm# (дата обращения: 15.03.2016).

17. Постановление Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2013 г. № 820 г. Москва «О государственном надзоре за спортивными парусными судами, прогулочными судами и маломерными судами, используемыми в некоммерческих целях, об их классификации и освидетельствовании, о государственной регистрации маломерных судов, используемых в некоммерческих целях, а также об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rg.ru/2013/09/24/malomerky-site-dok.html (дата обращения: 15.03.2016).

18. Государственная инспекция по маломерным судам [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.mchs.gov.ru/dop/sily/Gosudarstvennaja_inspekcija_po_malomerni (дата обращения: 15.03.2016).

19. ГОСТ 28556-90 «Моторы лодочные подвесные. Типы. Основные параметры. Общие технические требования». — М.: Стандартинформ, 2005. — 6 с.

20. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 180 с.

21. Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» (утв. Постановлением Правительства РФ от 27 февраля 2008 г. № 118) (с изменениями от 25 сентября, 30 декабря 2008 г., 21 апреля 2010 г., 7 сентября 2011 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gosthelp.ru/text/Postanovlenie118Texniches.html (дата обращения: 15.03.2016).

STANDARDIZATION IN THE INDUSTRY OF SHIP, LOCOMOTIVE AND INDUSTRIAL ENGINE

The article discusses the impact of engine technology on the development of various industries, including marine and river transport. Reforming the economy significantly affected the state of standardization in this area.

The authors considered the main directions of the state, interstate and international standardization, analyses the structure of existing standards, are listed the main achievements in their creation from the point of view of the interests of producers and consumers of internal combustion engines. Given the current state of engine development, suggested activities in standardization engine, which will help to improve the safety, reliability, environmental and operational characteristics of the engine. installations with diesel engines for various purposes.

It is noted that future advances in this direction are connected with the coordination of specialized and related organizations operating in the fields of creating of marine, terrestrial and other units with diesel engines for different purposes.

Keywords: development, engine industry, transport, marine engines, maritime shipping, inland shipping, road transport, railway transport, electric units, standardization, security, environment, livelihoods, infrastructure, verification of conformity.

REFERENCES

1. Zakon RF ot 10 iunja 1993 g. № 5154-I «O standartizacii». Web. 10 Oct. 2014 <http://www.gosthelp.ru/text/Zakon51541Ostandartizacii.html>.

2. Federalnyj zakon ot 27 dekabrja 2002 g. № 184-FZ «O tehnicheskom regulirovanii». Web. 15 Feb. 2016 <http://www.rg.ru/2002/12/27/tehreglament-dok.html>.

3. GOST R 1.0-2012 «Standartizatsiya v Rossiyskoy Federatsii. Osnovnyie polojeniya». Web. 22 Dec. 2015 <http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_%D0%A0_1.0-2012>.

4. GOST 1.0-2015 «Mejgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Osnovnyie polojeniya». Web. 22 Dec. 2016 <http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1.0-2015>.

5. Russian Federation. Government resolution N 620, 12 Aug. 2010. "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti obektov morskogo transporta".

6. Russian Federation. Government resolution N 623, 12 Aug. 2010. "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti obektov vnutrennego vodnogo transporta".

7. Russian Federation. Government resolution N 753, 15 Sep. 2009. "Tehnicheskij reglament o bezopasnosti mashin i oborudovanija".

8. Ship&Offshore/Schiff&Hafen 3 (2010). Web. 15 Sep. 2013 <http://www.ihr-emagazin.de/eMags/emags_online_demo/ship_2010/index.html#37>.

9. Ship&Offshore/Schiff&Hafen. Web. 15 Sep. 2013 <http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/CIMAC2013.pdf>.

10. "Itogi i reshenie Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Razvitie dvigatelestroenija v Rossii»." *Dvigatelestroenie* 2 (2009): 3–7.

11. "Koncepcija podprogrammy «Sozdanie i organizacija proizvodstva v Rossijskoj Federacii v 2011–2015 godah dizelnyh dvigatelej i ih komponentov novogo pokolenija» Federalnoj celevoj programmy «Nacionalnaja tehnologicheskaja baza» na 2007–2011 gody." *Dvigatelestroenie* 2 (2011): 3–11.

12. Nersesjan, L. "Voenno-morskoj flot Rossii: importozameshhenie i konkurencija." Mezhdunarodnyj voenno-morskoj salon MVMS-2015. Web. 7 Jan. 2016 <http://regnum.ru/news/polit/1939844.html>.

13. Kulikov, A. V. "Dejatelnost VNIINMASh po standartizacii v oblasti avtotransporta. Itogi raboty za poslednie 10 let i perspektivy." *Vestnik VNIINMASh* 1(14) (2013): 53–59.

14. Petrov, A. P., and G. E. Zhivljuk. "Harmonization of domestic and international standards in the field of internal combustion engines." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 244–258.

15. Federalnyj zakon ot 23 aprelja 2012 g. N 36-FZ "O vnesenii izmenenij v otdelnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federacii v chasti opredelenija ponjatija malomernogo sudna". Web. 15 March 2016 <http://ivo.garant.ru/#/document/70165836:0>.

16. Kodeks torgovogo moreplavanija Rossijskoj Federacii. Web. 15 March 2016 <http://www.gims.ru/zakon/zakon_19990430_81FZ_Kodeks_Trade_More.htm#>.

17. Postanovlenie Pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 18 sentjabrja 2013 g. N 820 g. Moskva "O gosudarstvennom nadzore za sportivnymi parusnymi sudami, progulochnymi sudami i malomernymi sudami, ispolzuemymi v nekommercheskih celjah, ob ih klassifikacii i osvidetelstvovanii, o gosudarstvennoj registracii malomernyh sudov, ispolzuemyh v nekommercheskih celjah, a takzhe ob izmenenii i priznanii utrativshimi silu nekotoryh aktov Pravitelstva Rossijskoj Federacii". Web. 15 March 2016 <http://www.rg.ru/2013/09/24/malomerky-site-dok.html>.

18. Gosudarstvennaja inspekcija po malomernym sudam. Web. 15 March 2016 <http://www.mchs.gov.ru/dop/sily/Gosudarstvennaja_inspekcija_po_malomerni>.

19. Russian Federation. GOST 28556-90. Outboard engines. Types. Basic parameters. General technical requirements. M.: Standartinform, 2005.

20. Russian Federation. GOST 4401-81. Standard atmosphere. Parameters. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2004.

21. Tehnicheskij reglament "O trebovanijah k avtomobilnomu i aviacionnomu benzinu, dizelnomu i sudovomu toplivu, toplivu dlja reaktivnyh dvigatelej i topochnomu mazutu" (utv. postanovleniem Pravitelstva RF ot 27 fevralja 2008 g. N 118) (s izmenenijami ot 25 sentjabrja, 30 dekabrja 2008 g., 21 aprelja 2010 g., 7 sentjabrja 2011 g.). Web. 15 March 2016 <http://www.gosthelp.ru/text/Postanovlenie118Texniches.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Орлов Евгений Иванович — заместитель директора.
Центральный научно-исследовательский дизельный институт
diesel@cnidi.ru
Петров Александр Павлович — кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
kaf_seu@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Orlov Evgenij Ivanovich — Deputy Director.
Central Research Diesel Institute
diesel@cnidi.ru
Petrov Aleksandr Pavlovich — PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
app.polab@inbox.ru
Zhivlyuk Gregory Evgenyevich — PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
kaf_seu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 года

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-156-176
УДК 629.5.03.-8

А. А. Иванченко,
В. А. Шишкин,
В. Н. Окунев

ОБЗОР ОПЫТА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СОВРЕМЕННОМ СУДОСТРОЕНИИ

В статье выполнен анализ современных предпосылок совершенствования конструкции пропульсивных комплексов судов, резервов традиционных конструктивных схем, конструкций и опыта применения винторулевых колонок с электрическим и механическим приводом, выполнено обобщение опыта проектирования, монтажа и технической эксплуатации. Показано, что в совершенствовании гидродинамического комплекса судна кроются значительные резервы повышения его энергоэффективности. Отмечается, что традиционные пропульсивные системы двигатель – передача – валопровод – движитель с винтами фиксированного и регулируемого шага, претерпев усовершенствования, сохраняют свои позиции преимущественно на крупнотоннажных океанских судах с главными двухтактными двигателями, где их КПД остается самым высоким. Выполнен обзор рынка применяемых в отечественном и зарубежном судостроении ВРК компаний «ABB Marine», «Rolls-Royce OY Ab», «Schottel», «Steerprop» и др. Сформулированы выводы и рекомендации по дальнейшему совершенствованию движительных систем.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, пропульсивный комплекс, корпус судна, движитель, винт регулируемого шага, винт фиксированного шага, винторулевые колонки.

Предпосылки для поиска новых технических решений

История технических разработок, направленных на обеспечение эффективности энергетических установок судов, уходит в глубь времен — к моменту создания первого судна с тепловым двигателем. Новый импульс активности специалистов в поиске ее решения придала Резолюция 8 по выбросам углекислого газа с судов. Взвешенно следуя указаниям Резолюции 8, Международная морская организация (*International maritime organization* — IMO, далее ИМО) приняла в декабре 2003 г. Резолюцию А.963(23) «Политика и практика ИМО, относящаяся к сокращению

выбросов парниковых газов с судов», в которой определены пути сокращения этих выбросов посредством технических и эксплуатационных мер. Впоследствии, после углубленной доработки и обсуждения, рассматриваемые принципы были включены в новую редакцию Приложения 6 к МАРПОЛ 73/78 и вступили в силу в 2013 г. [1]. Это привело к коренному пересмотру подходов к рассмотрению эффективности судовых энергетических установок (СЭУ) и судна в целом. В результате в современном судостроении не только декларируется, но и происходит переход от рассмотрения частных случаев повышения КПД агрегата к комплексной интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели судна. Целью технических решений в современной трактовке стало улучшение энергетической эффективности строящихся судов путем внедрения требований по конструктивному индексу CO_2, выраженному в г·CO_2/т-милю.

В качестве научной основы для решения задачи такого рода может быть положено представление о судовом гидромеханическом (пропульсивном) комплексе как о системном объекте. Оно впервые четко сформулировано в 60 – 70-е годы XX в. в работах М. А. Брука [2], К. Л. Ржепецкого [3] и далее развивалось в работах Н. В. Голубева [4], Ф. М. Кацмана [5], Ю. М. Кулибанова [6], С. В. Камкина [7], В. К. Румба [8], Л. С. Артюшкова [9] и др. На основе обобщения исследований указанных авторов Г. А. Артемонов в работе [10] предложил системную модель судового пропульсивного комплекса, наглядно демонстрирующую динамическое взаимодействие его элементов при движении судна в схематическом виде:

$$N_e^{\text{ГД}}(n_{\text{ГД}}) \leftrightarrow \left[N_e^{\text{ГД}}(n_{\text{ГД}})\, n_n n_{\text{вп}} = -N_{\text{в}}(n_{\text{в}})\right];$$

$$\left[N_{\text{в}}(n_{\text{в}}) = P(\nu_p n_{\text{в}})\frac{\nu_p}{\eta_p}\right] \leftrightarrow \left[P_e(\nu n_{\text{в}})\frac{\nu}{\eta} = \frac{R(\nu)\nu}{z\eta}\right],$$

где $N_e^{\text{ГД}}$ — мощность двигателя; $n_{\text{ГД}}$ — частота вращения его вала; $N_{\text{в}}$ — мощность, подведенная к винту; $n_{\text{в}}$ — частота вращения гребного вала; η — пропульсивный коэффициент; z — число гребных винтов; v — скорость судна; v_p — скорость воды в диске гребного винта; η_p — КПД гребного винта; P — упор винта; P_e — полезная тяга гребного винта.

Из приведенной зависимости следует, что наиболее важной характеристикой пропульсивного комплекса является зависимость $R = f(v)$, которая является достаточно сложной многофакторной зависимостью от формы обводов корпуса, его полноты и состояний поверхности, осадки судна, глубины и ширины фарватера, продолжительности плавания, состояния моря и погоды. Взаимодействие сопротивления корпуса R и гребных винтов $N_{\text{в}}(n_{\text{в}})$ для вала гребного винта характеризует *винтовая характеристика судна* [3], форма которой зависит, в первую очередь, от характера изменения сопротивления корпуса судна $R = f(v)$ от скорости движения судна. В результате взаимодействия характеристик корпуса $R = f(v)$ с характеристиками гребных винтов: $P = f(n, v)$ и $N_{\text{в}} = f(v, n, \eta)$, образуется винтовая характеристика, определяющая режим работы главного двигателя (ГД) — винтовой характеристики двигателя $N_{\text{д}} = f(n_{\text{д}})$, *которая* характеризует эксплуатационные показатели ГД и расход топлива. *Собственные характеристики* ГД определяют возможную область режимов использования и параметры их работы, в том числе допустимые при этом нагрузки. Собственными характеристиками дизеля являются: внешние, частичные внешние, ограничительные, нагрузочные, регуляторные и др.

В общем случае эффективность пропульсивного комплекса с дизельной установкой может быть охарактеризован его КПД:

$$\eta_e^{\text{ПК}} = \eta_e^{\text{ГД}}\,\eta_{\text{п}}\,\eta_{\text{ВУ}}\,\eta = \eta_e^{\text{ГД}}\,\eta_{\text{п}}\,\eta_{\text{ВУ}}\,\eta_p\,\eta_{\text{к}},$$

где $\eta_e^{\text{ГД}}$ — эффективный КПД главного двигателя; $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи; $\eta_{\text{ВУ}}$ — КПД валопровода; η_p — КПД винта; $\eta_{\text{к}} = (1 - t)/(1 - \omega)$ — коэффициент влияния корпуса; t и ω — коэффициенты засасывания и попутного потока для винта, которые в совокупности отражают влияние корпуса судна на работу гребного винта в виде коэффициента $\eta_{\text{к}}$.

Изучение всех технических аспектов проблемы на фоне необходимости удовлетворения требований IMO показало, что потенциал для экономии энергии велик и может достигать величи-

ны 50 %. При этом возможности ГД, характеризуемые его КПД, по мнению экспертов, достигли своего предельного значения. Дальнейшее его повышение внедрением утилизации тепла с целью получения электроэнергии и привода вспомогательных механизмов существенно усложняет энергетическую установку, ведет к повышению ее стоимости и снижению надежности.

Наиболее перспективным является направление оптимизации характеристик корпуса и гребного винта. При этом винт по отношению к корпусу и ГД судна является вторым по значимости элементом пропульсивного комплекса (ПК) и во многом определяет надежность, экономичность и безопасность плавания судна. Соответственно следующими по значимости после корпуса для ПК являются характеристики гребных винтов. Наиболее распространенные из них – *кривые действия гребного винта в свободной воде* — представляют собой изменение безразмерных коэффициентов упора K_1 момента K_2 и КПД винта η_p в зависимости от относительной поступи винта λ_p. Эти характеристики в абсолютном или относительном виде используются для отображения как собственных характеристик двигателя, так и винтовых характеристик двигателя и судна и используются на этапе разработки технического задания на проектирования судна.

Выбор типа ПК и ограничительных параметров, в значительной мере определяющих компоновочную схему ПК, выполняет конструктор с учетом требований, являющихся следствием предварительного анализа конструкции корпуса, как элемента системы более высокого уровня. Чаще всего это требования повышенной экономичности, надежности, ресурса и скорости судна по сравнению с существующими вариантами конструкции судна-прототипа. Кроме того, в последнее время выдвигаются требования высокой энергетической эффективности его главной энергетической установки. В этих случаях, как правило, не возникает необходимости в принципиально новых разработках основных элементов и узлов ПК, и прототип выбирают из множества вариантов, имеющихся на рынке при наличии ряда ограничений (по грузовместимости судна, его скорости, габаритным размерам машинного отделения, весу оборудования и др.).

В этом плане движительные системы (винты регулируемого и фиксированного шага (ВРШ и ВФШ), винторулевые колонки и водометные движители) в настоящее время в мире предлагают многие производители. Только в России серийное производство винтов началось в 1954 г. и в настоящее время по документации НПО «Винт» изготовлено более 4500 ВРШ диаметром 1,0 – 7,5 м и мощностью от 200 до 40000 л. с. Среди зарубежных производителей винтов и рулевых колонок авторами работ отмечаются фирмы «Wartsila», «Finnoy», «HRP», «Schottel», «Steerprop», «Rolls-Royce» и др. [11] – [14].

В качестве наиболее важных требований при выборе движительной системы при проектировании пропульсивного комплекса специалистами [13] – [16], [17] принимается ее соответствие высоким требованиям в отношении надежности эксплуатации и экономичности. Пополнение мирового флота специализированными судами с высоким уровнем энергоемкости и автоматизации обостряет проблему экономических потерь, связанных с неэффективной эксплуатацией и вынужденными незапланированными простоями судна. В этих условиях принятие мер по предотвращению, восстановлению или поддержанию работоспособности движителей при нахождении судна в море основывается на системном анализе выполненных разработок, освещающих развитие конструкций современных движителей, особенностей их проектирования и использования.

Анализ резервов развития традиционных гидродинамических комплексов

Выполненный подобного рода анализ предложений ведущих производителей показывает, что благодаря своей простоте в судостроении по-прежнему находят применение при строительстве новых судов ВФШ (рис. 1). Современные гребные винты этого типа имеют большую степень отработки своей геометрии, которые при ее соответствующей форме прилегающего корпуса по-прежнему обеспечивают высокие значения пропульсивного КПД. Несмотря на это интерес к ним в последние годы несколько снизился в связи с появлением на рынке более эффективных пропульсивных систем, которым в определенном диапазоне водоизмещений морских и речных судов установки с ВФШ уступают по целому ряду показателей [18], [19]. В то же время интерес к ним

сохраняется, когда требуется оптимальная эффективность, надежность и устойчивость в работе. Как правило, это крупнотоннажные суда океанского плавания: контейнеровозы, танкеры, балкеры и сухогрузные суда. Эти суда, как правило, оснащены очень мощными двухтактными двигателями, которые по своим удельным показателям превосходят современные среднеоборотные и высокооборотные двигатели и имеют частоту вращения, оптимальную для рассматриваемого винта. Поэтому основные мероприятия по улучшению этих характеристик проводятся в направлении разработки специальных энергосберегающих устройств, которые позволяют использовать ГД судна с наибольшим эффектом в соответствии с его функциональным назначением.



Рис. 1. Винт фиксированного шага фирмы «Wärtsilä»

Производители ВФШ гарантируют максимальную эффективность и минимальные уровни шума и вибрации для всех типов судов благодаря специально разработанным конструкциями с последующей доводкой технологии обработки с учетом усталостных свойств материала. Дополнительным преимуществом является хорошая ремонтопригодность винтов и технологичность. Они могут быть изготовлены так, чтобы удовлетворить всем предъявляемым жестким требования к количеству и размеру лопастей. Кроме того, их изготовители, как правило, кроме проектирования и изготовления винта, берут на себя проектирование, изготовление и поставку полного набора элементов конструкции валопровода: гребного и промежуточных валов, дейдвудного устройства, упорного и опорного подшипников и других элементов [20] – [24].

В настоящее время наибольшее распространение имеют гребные винты с оребренным обтекателем ступицы гребного винта (ГВ) или обтекателем с крыльевыми элементами — ОКЭ (рис. 2) [25] – [27]. Он обеспечивает увеличение эффективности ГВ на 4 – 5 % при увеличении скорости хода судна на 1 – 2 % и частоты вращения ГВ на 1 – 1,5 об/мин при сохранении мощности ГД, снижение вибрации и шума от работы движителя. Простота конструкции ОКЭ позволяет совмещать его установку с модернизационными работами.



Рис. 2. Гребной винт с обтекателем с крыльевыми элементами

Не менее значимую позицию на рынке пропульсивных систем занимают ВРШ. Гребные винты этого типа обеспечивают отличную производительность и маневренность. Для судов с частыми заходами в порт, ВРШ являются идеальным выбором для пропульсивных комплексов, в сочетании, как со среднеоборотными, так и с малооборотными дизельными двигателями. В установках рассматриваемого типа полная мощность двигателя обеспечивается в тяжелых и легких условиях плавания благодаря автоматической регулировке шага. ВРШ позволяют избежать перегрузки двигателя при любых условия плавания, позволяют оптимизировать косые углы, чтобы минимизировать шум и вибрацию, а использование в комплексе с этими винтами комбинаторной системы управления позволяет избегать резонансных явлений [17], [28], [29].

Благодаря указанным преимуществам ВРШ хорошо зарекомендовали себя в работе, обеспечивая оптимальное функционирование пропульсивной системы. Они компактны, имеют мало комплектующих компонентов, малый вес, отработанные сильные конструкции ступиц, точное бесступенчатое гидравлическое регулирование шага. Общий вид такого винта, производимого фирмой «Wärtsilä» [30], показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид винта регулируемого шага фирмы «Wärtsilä» в сборе

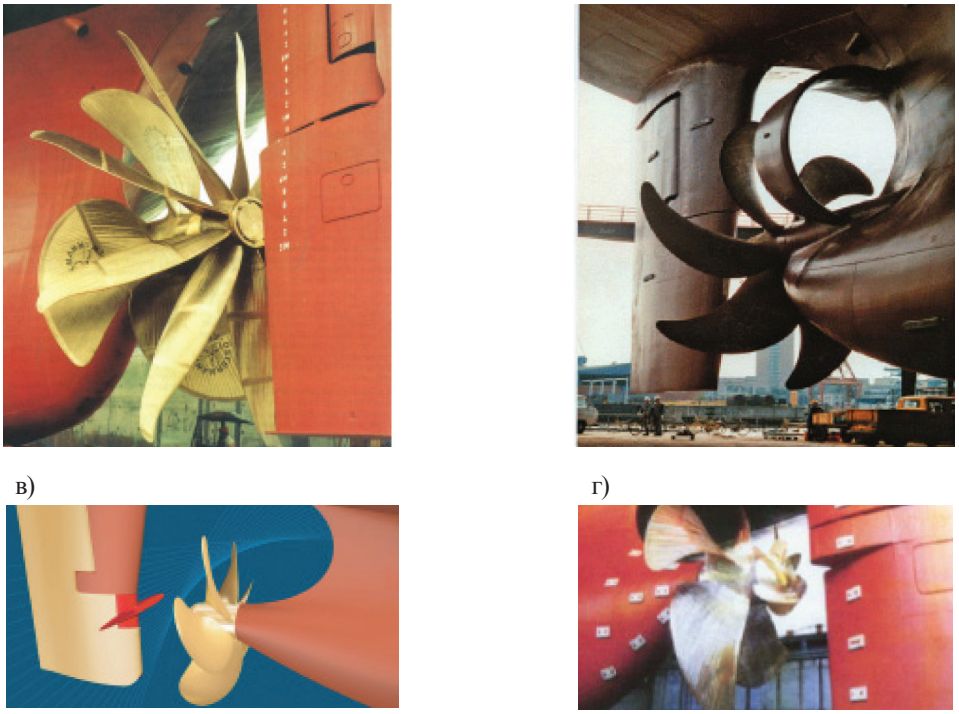
При выборе типа движителя на раннем этапе проектирования обращают внимание на корпус, который для каждого движителя имеет свои особенности. Для того чтобы достичь максимально возможной общей эффективности судна, винт должен идеально сочетаться с двигателем и корпусом.

Для определенного класса судов совместно с ВФШ и ВРШ их производители предлагают также двигательные системы *винт – насадка*. Насадки и преднасадки [11], [27], [30], установка которых совместно с обводами корпуса судна и компоновкой движителя обеспечивает повышение КПД комплекса ГВ (насадка на 20 – 30 %), имеют меньшую зависимость режима его работы от скорости хода и практически полное использование мощности ГД на всех режимах работы ГВ. Расчетный диаметр гребного винта в насадке уменьшается. Соответственно для одних и тех же судов фирмы предлагают винты в насадке с размерами меньшими, чем производители открытых винтов. Например, фирма «Wärtsilä» предлагает такие гидродинамические системы с винтами диаметром 1000 – 3500 мм. Для ликвидации возможного явления щелевой кавитации на теле насадки и концах лопастей ГВ при скорости выше 18 – 20 уз концы лопастей выносят за пределы насадки в корму, формируя комплекс *ГВ – преднасадка*. Такая конструкция, обеспечивая достаточную эффективность работы движительного комплекса, исключает появление кавитационной эрозии.

Комплексные движительные системы с ВФШ для диаметров винта до 3500 мм получили применение на следующих наиболее распространенных типах судов: моторные яхты, принадлежащие государству суда, суда, предназначенных для внутренних водных путей, другие специальные суда с дизельным приводом движения.

Специальные крыльевые системы перед ГВ и за ним, включающие их применение совместно с направляющими насадками [11], [27], представлены на рис. 4. В качестве таких систем применяются как дополнительные устройства и устройства направляющего или спрямляющего аппарата для потока воды, так и различного рода контрпропеллеры и пропульсивные насадки, обеспечивающие выигрыш на тяжелонагруженных судах до 5 – 9 % или повышающие КПД винта до 10 – 15 % для одновальных судов. При установке за ГВ гидродинамические стабилизаторы обеспечивают экономию энергии 3 – 6 %. Однако контрпропеллеры очень чувствительны к режиму работы ГВ и при отклонении его от расчетного могут привести к уменьшению КПД. Эффективность работы ГВ в насадке может быть еще более повышена применением ОКЭ за счет экономии потребляемой мощности на 4 – 5 % при нагрузке и свободном движении судна на 7 – 8 %.

а) б)



в) г)

Рис. 4. Современные конструктивные решения
для повышения эффективности пропульсивной системы:
а — соосно с винтом крыльчатки; *б* — перед винтом асимметричных насадок;
в — установка специальных крыльчаток; *г* — установка специальных винтов для выравнивания потока

Специализированными фирмами проводятся исследования по совершенствованию конструкции винтов и применению новых материалов. Так установлено, что применение в элементах конструкции ГВ композитных материалов способствует значительному снижению шума (по сравнению с бронзовыми), уменьшению кавитации, снижению веса и увеличению эффективности (КПД) винта, что является полезным и перспективным для движителя. Использование композитных материалов для изготовления лопастей, естественно, приводит к сборности конструкции, применение которой само по себе обеспечивает значительное снижение виброактивности конструкции ГВ по сравнению с цельнолитой конструкцией.

Дополнительным существенным преимуществом композитного материала является снижение электрического и магнитного поля, а также отсутствие коррозионных повреждений лопастей в процессе эксплуатации. Основной недостаток внедрения композитных материалов для ГВ заключается в сложности оптимального подбора материалов при формировании конструкции лопасти, которые обеспечивают точность изготовления ГВ высшего класса, ударостойкость и устойчивость от эрозии, и положительную динамику в организации технологии необходимого производства.

Опыт разработки ГВ для различных типов судов гражданского судостроения позволил выявить основные их геометрические параметры и прочие условия, оказывающие влияние на пропульсивные качества их работы. Основными геометрическими элементами ГВ, которые определяют пропульсивные качества и эффективность работы винтов, являются следующие: число лопастей, дисковое отношение, форма контура лопасти, форма профиля лопасти, шаговое отношение, диаметр ГВ и его ступицы. При этом задача проектирования движителя трактует выбор таких его характеристик, которые наиболее эффективно используют мощность ГД и потребляют минимальную мощность ГД для получения заданной скорости хода или наибольшей тяги. Кроме того, принимается во внимание обеспечение соответствия характеристик ГД (мощности, частоты вращения) работе движителя не только на основном режиме, но и во всем диапазоне изменения сопротивления судна и возможных скоростей хода, состояния корпуса условий плавания (волнения) и т. д. Полный учет особенностей эксплуатации судна приводит к необходимости проектирования движителя, потребляемая мощность и частота вращения которого на некоторых режимах будут отличаться от номинальных характеристик ГД.

Анализ рынка современных пропульсивных систем

В последнее время для повышения эксплуатационных и маневренных характеристик судов широкое распространение нашли так называемые *пропульсивные системы*, которые представляют собой объединение движительного и рулевого комплекса в одном агрегате. Такие пропульсивные системы кроме функций ГВ выполняют роль активных средств управления судном, вплоть до разворота на месте, отличных от пассивных средств рулевого комплекса, не работающих при отсутствии хода судна и в качестве вспомогательных и подруливающих устройств. Иногда их называют винторулевыми колонками (ВРК) [13], [27], [31], [32]. ВРК по типу силового привода гребного винта разделяются на колонки с электрическим и механическим приводом.

В настоящее время накоплен большой мировой опыт применения пропульсивных систем, разнообразных по конструкции и типам применяемых движителей, а также по схеме приводной мощности на вал ГВ, компоновке и типу применяемого ГД. Достаточно широк и диапазон применения ВРК по типам судов. Они устанавливаются на круизных лайнерах, контейнеровозах, танкерах арктического типа, ледоколах, паромах, десантных вертолетоносцах, гидрографических и рыбодобывающих судах, а также судах технического флота, буксирах, плавкранах, вспомогательных плавсредствах и самоходных буровых платформах.

Следует заметить, что производством ВРК за рубежом в основном занимаются крупные многопрофильные компании, у которых собственно ВРК являются лишь одним из видов машиностроительной продукции. Имеется также ряд развивающихся молодых фирм, выпускающих ВРК. Среди них в России объявили о намерении строить ВРК ОАО ЦС «Звездочка» и ОАО «Пролетарский завод» [13]. Филиал ОАО ЦС «Звездочка» — НПО «Винт» — в рамках федеральной целевой программы развития гражданской морской техники разработал и в ближайшем будущем должен приступить к серийному производству аналога колонки «Rolls-Royce» «Aquamaster» ВРК марки ДРК-3500 мощностью 3,5 МВт. ОАО «Пролетарский завод» намерен специализироваться на ВРК с передаваемой мощностью до 1 МВт, ОАО ЦС «Звездочка» — на машинах с передаваемой мощностью в пределах 1 – 10 МВт, а затем и большей. Присущие ВРК особенности можно наглядно рассмотреть на примере винторулевых колонок, широко представленных на мировом рынке: «Azipull», «Contaz», «Aquamaster» и др. [31].

Анализ конструкций и опыта применения электроприводных ВРК

Электроприводные ВРК с электродвигателями, размещенными в гондоле и непосредственно вращающими гребной винт, выпускают фирмы ABB Group (ВРК типа «Азипод» Azimuthing Electric Propulsion Drive) и Schottel (ВРК «Siemens Schottel Propulsor». На их применении подробно останавливаются авторы работ [9], [33] – [37]. В зарубежных публикациях подобные ГВРК носят название «Азипод» (от Azimuthing Electric Propulsion Drive) [19], [35], [37], [29], [38], [39].

Типовая схема главной винторулевой колонки (ГВРК) с электродвигателем в гондоле представлена на рис. 5. Она используется крупнейшими зарубежными фирмами — «ABB Marine» и «Roll-Royce OY Ab» [9], [36], [40]. Мощность серийных ГВРК этого типа колеблется в диапазоне 5 – 35 МВт. Они выпускаются в одновинтовой и двухвинтовой компоновке. Фирмы предлагают поставку по специальному заказу ГВРК еще большей мощности. Колонки с электроприводом одного или двух гребных винтов, способные разворачиваться на 360°, обеспечивают движение судов на всех ходовых режимах и в любом направлении, в том числе с разворотом на месте вокруг своей оси. Двухвинтовые ГВРК с электроприводом выпускаются, в частности, компанией «Siemens».

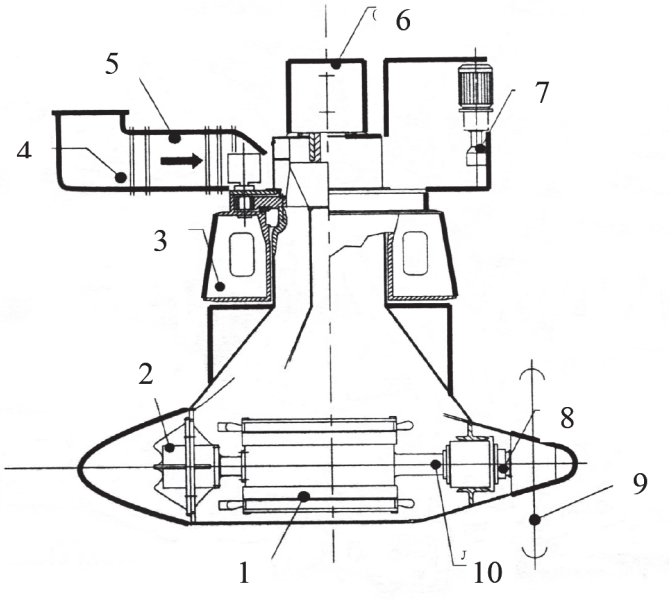


Рис. 5. Типовая схема ГВРК с электродвигателем в гондоле: *1* — электродвигатель; *2* — упорный подшипник; *3* — установочный блок; *4* — вентиляционная установка; *5* — воздухоохладитель; *6* — токосъемник; *7* — гидравлическая система поворота колонки; *8* — подшипник и уплотнения гребного вала; *9* — винт фиксированного шага; *10* — гребной вал

Однако чаще чем двухвинтовая схема «Азипод», применяется компоновка, когда на поворотной колонке установлен только кормовой винт. При этом носовой винт имеет традиционное расположение и приводится во вращение гребным валом. Особенностью такой схемы является возможность обеспечения противоположного направления вращения гребных винтов, что способствует улучшению эффективности пропульсивного комплекса.

Винторулевые колонки «Azipull» зарекомендовали себя в качестве очень эффективных движительных комплексов, подходящих для судов мощностью от 900 – 5 000 кВт. Винторулевая колонка «Azipull» комбинирует преимущества гребного винта с гибкостью механического двигателя и может быть связана с любым первичным двигателем: дизелем, газовой турбиной или электродвигателем. Такая разработка выполнена, чтобы предложить эффективный упор и маневренность на более высоких (обычно 20 – 25 уз) скоростях. Обтекаемая колонка и закрылки возвращают энергию закручивания из зоны пониженного давления потока, повышая эффективность движения. У колонки имеется широкая хорда, что оптимизирует и улучшает управляемость и обеспечивает стабильность курса. «Azipod» может поставляться с винтами, как регулируемого, так и фиксированного шага [38], [41] – [47].

Пропульсивная система компании «Azipod» с погружным электродвигателем представляет собой движительно-двигательный комплекс с погружным электродвигателем и регулировкой частоты вращения от 0 до номинальных, который обеспечивает мощность до 14 мВт (рис. 6). Общее расположение при использовании системы может быть оптимизированно. Применяется на судах разного водоизмещения: от круизных до судов технического и исследовательского флота и ледо-

колов. Высокая маневренность обеспечивается поворотом колонки на 180 °. Колонка также позволяет экономить место установки, обеспечивает хорошую маневренность и стабильность курса, может быть соединен фактически с любым первичным двигателем, имеет уменьшенный диаметр винтов, низкий шум и вибрация [48] – [51].

В отличие от обычных рулей, ГВРК обеспечивают хорошую управляемость на заднем ходу. Это особенно важно на судах двойного действия DAS (double action ship), под которыми понимаются суда ледового плавания (танкеры, навалочники), движущиеся в ледовых условиях задним ходом. При движении кормой вперед ГВРК, работая как носовой движитель, снижает ледовое сопротивление, повышает ледопроходимость и эффективность судна в эксплуатации.

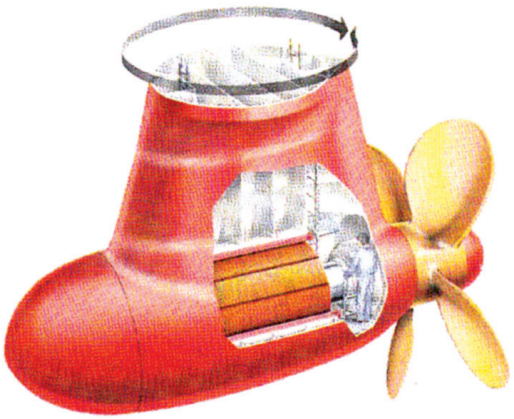


Рис. 6. Пропульсивная система фирмы «Azipod» с погружным электродвигателем

По оценкам компании «ABB Marine», применение ГВРК обеспечивает снижение эксплуатационных затрат до 8 %, причем более высокие показатели относятся к судам большего водоизмещения [9], [34], [36]. Наряду со стандартной конструкцией «Azipod» компанией «Roll-Royce OY Ab» применяются компоновки типа «компакт», предназначенные для относительно небольших судов с ограниченной осадкой и яхт.

Большой объем работ по исследованию гидродинамических характеристик ГВРК, одной из целей которых является выбор оптимальной компоновки, выполнен в Крыловском государственном научном центре [13], [20], [27].

Анализ конструкций и опыта применения ВРК с механическим приводом

Крупнейшими производителями ВРК (ВРК «Aquamaster» по названию первой фирмы-производителя с механическим приводам и угловой зубчатой передачей, так называемые «Z-peller», «Z-drive» и «L-drive», являются фирмы «Steerprop Ltd», «Schottel Gmbh», «Rolls-Royce», «Wartsila», «Niigata» [13], [30], [40]. Максимальная мощность ГВРК такого типа составляет 10 МВт. Компании выпускают ряд типоразмеров ГВРК, включающий ГВРК с одиночными и соосными винтами противоположного вращения и гребными винтами в направляющих насадках.

Принципиальная схема ГВРК с механической передачей мощности на винт приведена на рис. 7. Обычно мощность размещенного в корпусе судна двигателя передается от ведущего вала с помощью одноступенчатого редуктора, сформированного из пары зубчатых колес, на промежуточный вертикальный вал. На нижнем конце этого вала смонтирован понижающий конический редуктор с передаточным отношением, находящимся в пределах 1:3,3 – 1:6,1. Редуктор соединяет промежуточный вал с гребным валом.

В верхней части ГВРК установлена разобщительная муфта, соединяющая ведущий и вертикальный вал. При включении этой муфты начинается вращение гребного вала. Вертикальный и гребной вал находятся внутри корпуса стойки и гондолы, заполненной смазочным маслом. Гондола служит охладителем масла.

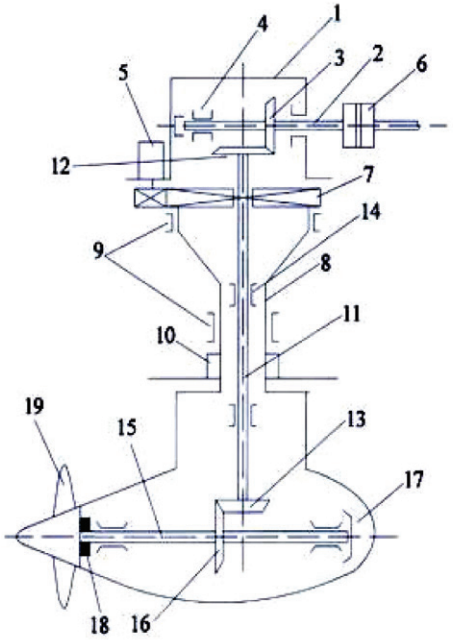


Рис. 7. Принципиальная схема ГВРК с механической передачей мощности на винт:
1 — сварной корпус; *2* — ведущий вал; *3* — ведущая угловая шестерня;
4 — радиально-упорные подшипники вала; *5* — гидравлический привод поворота кольца;
6 — разобщительная муфта; *7* — зубчатое колесо румпельного механизма;
8 — труба (стойка) колонки; *9* — подшипники, обеспечивающие поворот трубы;
10 — уплотнение входа трубы в корпус; *11* — промежуточный вертикальный вал;
12 — верхняя угловая ведомая шестерня; *13* — нижняя ведущая угловая шестерня;
14 — подшипники вертикального вала; *15* — гребной вал;
16 — нижняя ведомая угловая шестерня; *17* — радиально-упорные подшипники гребного вала;
18 — уплотнение гребного вала; *19* — гребной винт

В отличие от установок «Azipod», двигатель ГВРК этого типа (дизель или электродвигатель) расположен внутри корпуса судна и передача мощности на гребной винт осуществляется с помощью углового редуктора. Системы «Aquamaster» выпускаются как в стационарном исполнении, так и в исполнении, предусматривающем частичную уборку нижней части в корпус путем втягивания либо заваливания в специальный кожух. Ряд типоразмеров, выпускаемых компанией, предусматривает мощность до 3 МВт при различных диаметрах винтов в зависимости от номинальных оборотов. При минимальных номинальных оборотах диаметр достигает 5 м. В обобщенном виде основные характеристики ВРК с механическим приводом и угловой зубчатой передачей приведены в табл. 1 [13].

Таблица 1

Основные характеристики винторулевых колонок

Мощность ВРК, МВт	Упор гребного винта, кН	Диаметр гребного вала, мм	Диаметр гребного винта, мм	Производитель ВРК	Габарит осевой и вертикальный, м	Масса ВРК, т
1,0 – 1,5 (ВФШ с насадкой или без)	10	200	2100	«Schottel», «Rolls-Royce»	5 × 7	17 – 19
4,0 – 5,5 (ВФШ без насадки)	40 – 50	340	4500	«Schottel», «Rolls-Royce»	5,5 × 8	90 – 110
7,5 – 8,5 (ВФШ без насадки)	80 – 90	500	5600	«Steergrop»	6 × 9	140 – 160
3,5 – 4,5 (ВРШ в насадке)	40	460	4200	«Ulstein»	5 × 8	95 – 105

Вертикальный габарит ВРК зависит от наличия или отсутствия двойного дна у судна. Размерность ВРК па ширине примерно соответствует диаметру гребного винта. Поставка ВРК предлагается со всеми системами и трансмиссией от первичного двигателя либо по желанию заказчика с первичным двигателем-дизелем или электродвигателем соответствующей мощности. Также обеспечивается шефмонтаж поставленной продукции.

ВРК «Aquamaster» (рис. 8) с ВФШ в насадке мощностью до 24000 кВт обеспечивают высокую экономичность режимов работы, компактный монтаж и простое техническое обслуживание. Колонки могут использовать полную мощность при маневрировании с управлением на 360° и позиционировании, могут применяться на всех типах судов в тропических и арктических условиях, а также могут служить альтернативой для использования ВРШ [9], [13], [27].

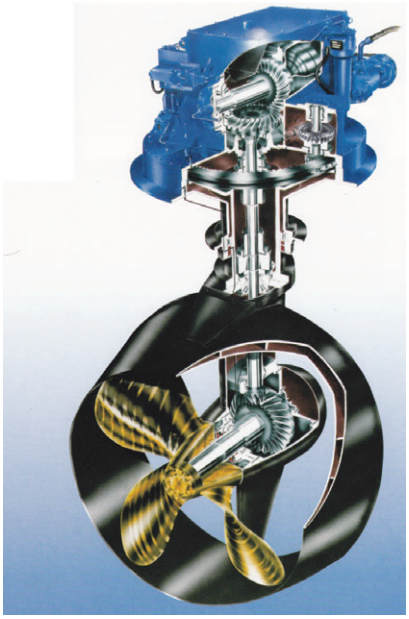


Рис. 8. Винторулевые колонки фирмы «AquamasteR» с одним винтом фиксированного шага

ВРК фирмы «Aquamaster» с винтами противоположного вращения представлена на рис. 9. Пропульсивная система хорошо зарекомендовала себя в установках мощностью до 10000 кВт, где она достигает эффекта благодаря модульному проектированию и легкости монтажа, а также благодаря увеличению КПД до 15 % за счет установки винтов с контрвращением. Колонка обеспечивает высокие пропульсивные качества, улучшенную устойчивость на курсе, уменьшение шума и вибрации. Увеличенная стоимость ВРК быстро окупается за счет экономии топлива при эксплуатации. Такая колонка имеет идеальное применение на судах с ограничением диаметра ГВ [27], [52].



Рис. 9. Винторулевые колонки фирмы «Aquamaster» с винтами противоположного вращения

На ГВРК типа «Aquamaster», в отличие от ГВРК «Azipod», двигатель непосредственно не связан с гребным винтом, а передача мощности осуществляется через две прямоугольные угловые передачи (или так называемую *Z*-образную передачу) [13], [27], [42], [43]. Кроме этой передачи в состав такой ГВРК входят разобщительная муфта и механизм разворота колонки на 360 °. Основная область применения ГВРК типа «Aquamaster» — буксиры, суда обслуживания технических средств освоения океана, а также паромы. Колонки «Aquamaster» могут также включаться в системы позиционирования. В настоящее время в классе Российского морского регистра судоходства (РМРС) эксплуатируется более 90 судов, оборудованных установками типа «Aquamaster», причем в их числе находятся суда ледового плавания.

ВРК «Contaz» представляют собой винторулевые колонки с винтами противоположного вращения и специально предназначены для торговых судов. Они обладают повышенным КПД, приблизительно на 10 – 15 % больше по сравнению с обычными винторулевыми колонками «Azimuth» за счет возврата некоторых из потерь в потоке. ВРК «Contaz» также обеспечивают низкий шум и вибрацию, хорошую маневренность на малых скоростях, характеризуются меньшими диаметрами винтов (на 20 % меньше, чем в традиционном пропульсивном комплексе), а также экономят место установки.

Значительных успехов в развитии модельного ряда азимутальных винторулевых колонок достигла компания «Steerprop». Диапазон мощностей колонок, изготавливаемых этой компанией, составляет от 500 до 6500 кВт. Колонки более высокой мощности изготавливаются по специальному заказу в соответствии с особыми требованиями проекта. Диапазон мощностей «Steerprop» оптимизирован в соответствии с требованиями рынка и подходит для использования на различных судах, в том числе на ледоколах арктического применения [13]. Одним из основных преимуществ ГВРК компании «Steerprop» является возможность проведения ремонта колонок без постановки судна в док.

ВРК «Steeprop» оснащены современной системой управления, регулируемой при помощи частотного преобразователя и включающей электрические или гидравлические приводы. Использование электродвигателей связано со следующими преимуществами: постоянная скорость управления, меньшая потребная мощность, меньшие потери мощности (выше КПД), меньшее количество конвекционного тепла (требуется меньше охлаждения), меньше трубопроводов, меньше шума, меньше обслуживания. Рулевая колонка уплотнена с использованием трехслойного манжетного уплотнения с вкладышами из нержавеющей стали для минимизации износа. Наиболее удаленная прокладка повернута вниз, чтобы сократить до минимума сбор загрязнений, изнашивающих прокладку. Тройная уплотняющая прокладка позволяет использовать устройство для промывки уплотняющей камеры в прокладках вала гребного винта. Вал гребного винта уплотнен с использованием тройного или четвертного кольцеобразного уплотнения. Пространство между уплотнениями заполняется уплотнительной жидкостью, находящейся под давлением по отношению к морской воде или смазочному маслу. Давление создается при помощи расширительного или герметичного бака. Уплотняющую жидкость можно контролировать визуально и спускать при необходимости.

Компания «Steerprop» использует высокоэффективные насадки собственной конструкции — НЈ3. Насадка спроектирована для увеличения тяги на 8 – 10 %, а также для увеличения максимального КПД на 10 – 15 % по сравнению со стандартными насадками. Винт находится в диффузорной части насадки и сдвинут дальше в корму, что позволяет установить насадку вплотную к поворотной оси колонки, а значит, минимизировать крутящий момент при управлении. Движители «Steerprop» оснащены мультидисковой муфтой с устройством проскальзывания. Дополнительно это устройство может также использоваться при электронном управлении и усиленном охлаждении, чтобы обеспечить управление скоростью винта от нуля до холостого хода движителя. Все соединения в механической передаче представляют собой либо конические, либо цилиндрические соединения посадки с запрессовкой. Отсутствуют шпоночные канавки, ухудшающие целостность вала, также нет шпонок, которые могут изнашиваться и ломаться.

Инженерам-конструкторам компании «Steerprop» удалось минимизировать количество деталей при создании винторулевых колонок. Эта компактная, простая и надежная конструкция делает техническое обслуживание более легким и требует меньше запасных частей.

Кроме того, в конструкции ВРК «Steerprop» используется принцип интегрированной безопасности как в корпусе, так и в механической передаче. Он включает в себя принцип последовательной прочности, при котором самые слабые детали либо дешевы, либо легко заменяемы, что важно в случае повреждения. В механической передаче самый слабый компонент — это лопасть винта, которая таким образом защищает ценные и труднодоступные части передачи. Что касается общей прочности конструкции корпуса, то тут внимание уделяется также безопасности: скрепленный болтами фланец в шахте рулевой колонки над винтом сконструирован так, чтобы в случае неожиданного удара при посадке на мель произошел контролируемый перелом.

ВРК фирмы «Schottel» (рис. 10) с ВРШ выпускаются для установок с входной мощностью от 150 кВт (Shottel SRP 0320) до 6500 кВт (Steerprop SP 80) [13], [27], [53]. Колонки данного типа бывают с винтами фиксированного и регулируемого шага. В комплектации с ВФШ они установлены на некоторых танкерах компании «Лукойл», однако диапазон мощностей на этом не заканчивается, так как фирмы могут изготовить практически любую винторулевую колонку по желанию заказчика. Этот тип ВРК может быть установлен непосредственно в корпусе или в контейнере. Контейнер может быть или подъемного, или выдвигающегося типа. По аналогии с колонками других производителей ВРК фирмы «Schottel» позволяют экономить место установки, обеспечивают хорошее управление на 360 ° и позиционирование, уменьшение шума и вибрации, имеют относительно уменьшенный диаметр винтов, что позволяет применять их на судах всех типов. Использование в ВРК винта регулируемого шага позволяет использовать нереверсивные ГД. Повышение экономичности пропульсивного комплекса обеспечивает их быструю окупаемость за счет экономии топлива.

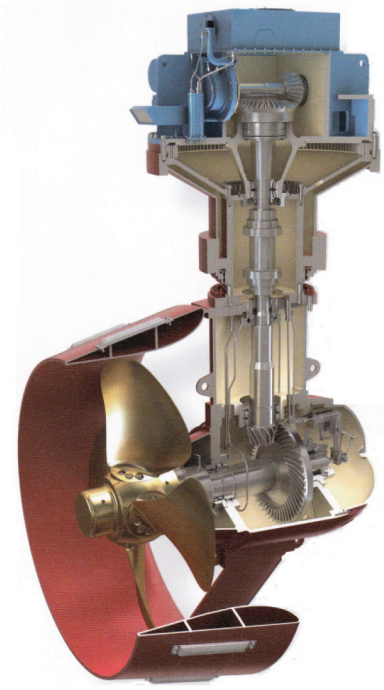


Рис. 10. Винторулевая колонка фирмы «Schottele» с ВРШ

Выполненный анализ показывает, что общей причиной широкого применению ВРК является целый ряд преимуществ ВРК перед традиционными движительными комплексами. Они обеспечивают высокий пропульсивный КПД, низкую виброактивность, упрощение компоновки и монтажа механической установки за счет отказа от длинного валопровода, позволяют значительно сократить размеры машинного отделения, в результате чего при одной и той же длине судна гру-

зовое пространство возрастает на 2 – 8 %. Кроме того, сборка колонок полностью (механические) или частично (электрические) может быть выполнена в береговых условиях на заводе или верфи, в результате чего монтаж, демонтаж и ремонт ВРК можно выполнять в более сжатые сроки, так как ВРК представляет собой сборочно-монтажную единицу. ВРК является более функциональным, чем в обычных движительных системах: улучшены маневренные качества судна, возможен реверс за счет разворота колонок без изменения направления вращения гребных валов, а в определенных случаях — движение судна лагом. Имеются и сугубо специфические предпосылки к преимущественному применению ВРК. Так, например, для крупных круизных судов это улучшение комфорта пассажиров благодаря устранению низкочастотной вибрации от главных двигателей, для судов ледового плавания — повышенная ледопроходимость, для паромов и буксиров — высокая маневренность, для вспомогательных плавсредств и самоходных буровых платформ — удобство при эпизодичности использования [13].

Обобщение опыта проектирования, монтажа и технической эксплуатации ВРК

Особенностью проектирования ПК судна с модульной пропульсивной системой является необходимость приспособления обводов корпуса, с помощью которых обеспечиваются максимально оптимизированные условия работы комплекса для достижения требуемого эффекта. Большие преимущества дают пропульсивным системам агрегатность их изготовления вплоть до поставки к ним систем управления, что является экономически целесообразным. Важным является также то обстоятельство, что ВРК применяются в паре с главными высокооборотными четырехтактными дизелями или электродвигателями с частотой вращения 1000 – 1500 об/мин и более, что позволяет исключить передачу и существенно уменьшить размеры машинного отделения. Указанная особенность предопределила границу широкого использования ВРК с двигателями мощностью до 4300 кВт [13]. Это примерно соответствует верхней границе мощностей имеющихся на рынке высокооборотных дизелей и нижней границе мощностей двухтактных дизелей, с которыми эффективнее оказывается классическая схема ПК. Соответственно ВРК получили наиболее широкое использование на судах, требующих высокой маневренности, паромах, буксирах, речных судах, на которых практически всегда используются четырехтактные дизели с вышеуказанной частотой вращения.

Кроме очевидного преимущества применения ГВРК на транспортных судах, в процессе их эксплуатации определился и круг недостатков [18], [19], [21], [22], к которым необходимо отнести следующие:

– повышенную конструктивную и технологическую сложность их изготовления и технического обслуживания;

– ограничение агрегатной мощности по сравнению с традиционными пропульсивными комплексами;

– тяжелые условия работы гребных электродвигателей и угловых редукторов и т. д.

В качестве иллюстрации последнего утверждения можно привести примеры характерного повреждения ВРК, зависящего как от их конструкции, так и от условий эксплуатации. Для ГВРК с механической передачей мощности на гребной винт, кроме повреждений лопастей винтов, можно выделить повреждения в зубчатых зацеплениях редукторов, которые работают в очень напряженных условиях эксплуатации, особенно в компьютеризованных системах динамического позиционирования, при резких изменениях нагрузки или при воздействии на лопасти винта льдин или других массивных и твердых объектов. Так, например, при ремонте и обслуживании шести ВРК системы динамического позиционирования японского бурового судна «Chikyu» с винтами диаметром 3,8 м в 2008 г. после почти трех лет эксплуатации были обнаружены выкрашивание и растрескивание зубьев нескольких редукторов.

Характер повреждений был тщательно проанализирован и было выявлено следующее:

– зубья малой шестерни вертикального вала, контактируя с зубчатым колесом гребного вала, могли вызвать растрескивание его зубьев;

– недостаточный запас прочности по внутренним касательным напряжениям или наличие посторонних включений в металле зубьев редуктора могли привести к их растрескиванию.

В качестве причин рассмотренных повреждений в результате исследований отмечаются конструктивные, технологические, материаловедческие и монтажные. Для предотвращения подобных повреждений было рекомендовано обратить внимание на необходимость более тщательной конструктивной проработки и в особенности на технологию изготовления и монтажа зубчатых зацеплений. В частности, было рекомендовано доработать форму и скруглить углы зубьев малой шестерни во избежание контакта с колесом редуктора, повысить точность сборки и отладки редуктора, доработать конструкцию для уменьшения касательных напряжений в редукторе и увеличения запасов прочности, предложить методы увеличения глубины цементации, повысить качество материала редуктора во избежание посторонних включений. Следует отметить, что оперативным решением проблемы стала замена на новые всех шести редукторов бурового судна «Chikyu».

На основании выполненного анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом совершенствования пропульсивных качеств движительных систем является совмещение различных конструктивных и гидромеханических решений с оптимальными для проектируемого судна показателями.

В связи с наличием на рынке большого количества технических решений по привязке винтов к главному двигателю сформировались вполне определенные предпочтения. Классические винты фиксированного и регулируемого шага в комплексе с классическим валопроводом практически находятся вне конкуренции в мощностном диапазоне от 4300 кВт и выше, характерном для нижней границы применения двухтактных высокоэкономичных двигателей. Ниже указанного предела ВФШ и ВРШ конкурируют с ВРК, часто уступая им в эффективности по целому комплексу показателей: массогабаритным, шуму и вибрации, простоте компоновки, монтажа, демонтажа и ремонта. ВРК при одинаковых диаметрах винтов обеспечивают более высокую эффективность пропульсивного комплекса и его высокую маневренность.

Выводы и рекомендации по дальнейшему совершенствованию движительных систем

Дальнейшее совершенствование движителей идет путем совершенствования пропульсивных качеств движительных систем. Оно достигается, как правило, совмещением различных конструктивных и гидромеханических решений в едином комплексе. Одним из предложений по повышению эффективности движительной системы является предложение о разработке вариантов двигательно-движительного комплекса, совмещающего в себе погружной электродвигатель и ГВ [13], [27], [32]. Статор такой системы расположен в насадке и является конструктивной основой всего устройства. Диапазон мощностей комплекса гребной электродвигатель в насадке (ГЭДН) не ограничивается. Особенностями ГЭДН, которые определяют его преимущества по сравнению с традиционной схемой электродвижения и приводом ГВ непосредственно от ГД являются: сравнительно малый вес и габариты, независимость положения ГЗДН по отношению к источнику электрического тока, возможность размещения в любой части судна или создание выдвижных устройств (отсутствие гребного вала, проходящего через корпус), не требующая охлаждающей системы, возможность использования соосных ГВ, возможность достижения низких уровней вибрации и шума в помещениях судна, хорошая ремонтопригодность и простота обслуживания.

Некоторыми из приведенных преимуществ обладает наиболее близкая к ГЭДН пропульсивная система «Azipod» или «Shottel & Simens», но большинство достоинств являются уникальными. По первичным оценкам эффект использования ГЭДН может заключаться в следующем: снижение массы оборудования и объемов, занимаемых средствами электродвижения на 20 – 40 %, увеличение пропульсивных характеристик судна на 15 – 20 %, снижение уровней шума в помещениях судна и в окружающей воде.

В процессе проектирования судна основные принципиальные критерии, определяющие выбор типа движителя или пропульсивной системы, должны обеспечивать следующее:

– максимальную эффективность использования движителя для функционального назначения судна на установившихся и переменных режимах работы при оптимальном размещении ГД;

– высокую степень гидродинамической отработки геометрических параметров движителя для достижения необходимых пропульсивных характеристик с учетом взаимодействия его с корпусом;

– простоту конструкции движителя и надежность его эксплуатации, уровень технологичности производства с учетом стоимости материала и комплектующих, ремонтопригодность;

– возможную эффективность совместной работы движителя с комплектом пассивных и активных средств управления;

– конструктивную простоту и надежность управления работой движителя и связанных с ним устройств и систем (валопровода, ГУП, механизма поворота лопастей и т.д.) во всем диапазоне режимов;

– быстроту окупаемости первичных затрат на производство движительного комплекса в период эксплуатации судна.

Главенствующими из всех задач разработки движителя являются условия конкретного проектирования для выбора его геометрических характеристик с одновременной отработкой обводов прилегающего корпуса с выступающими частями, поскольку ГВ и корпус представляют собой единую движительную систему [15].

Существует два подхода при выборе и проектировании движительного комплекса: проектирование движителя с учетом его приспособления к сформированному корпусу или выбор модульной пропульсивной системы, требующей отработки обводов корпуса в районах установки системы из условия обеспечения эффективной ее работы, а также оптимизации пропульсивных и маневренных характеристик.

Пути дальнейшего повышения эффективности движителей должны быть направлены на поиск новых конструктивных решений на основе анализа гидродинамических процессов, сопровождающих работу движителя. Значительную роль в этом может оказать использование в конструкции движителей или их элементов новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приложение 6 к МАРПОЛ 73/78 (пересмотренное). — Российский морской регистр судоходства, 2011. — 52 с.

2. *Брук М. А.* Режимы работы судовых дизелей / М. А. Брук. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 482 с.

3. *Ржепецкий К. Л.* Дизель в судовом пропульсивном комплексе / К. Л. Ржепецкий, А. А. Рихтер. — Л.: Судостроение, 1978. — 253 с.

4. *Голубев Н. В.* Проектирование энергетических установок морских судов / Н. В. Голубев. — Л.: Судостроение, 1980. — 311 с.

5. *Кацман Ф. М.* Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 222 с.

6. *Кулибанов Ю. М.* Экономичные режимы работы судовых энергетических установок / Ю. М. Кулибанов, П. А. Малый, В. В. Сахаров. — М.: Транспорт, 1987. — 208 с.

7. *Камкин С. В.* Эксплуатация судовых дизелей / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1990. — 343 с.

8. Румб В. К. Судовые энергетические установки. Ч I. Судовые дизельные энергетические установки / В. К. Румб, Г. В. Яковлев, Г. И. Шаров [и др.]. — СПб.: МГТУ, 2006. — 588 с.

9. *Артюшков Л. С.* Судовые движители: учебник для вузов / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. — Л.: Судостроение, 1988. — 296 с.

10. *Артемонов Г. А.* Судовые энергетические установки / Г. А. Артемонов, В. П. Волошин, Ю. В. Захаров, А. Я. Шквар. — Л.: Судостроение, 1988. — 313 с.

11. *Иванченко А. А.* Охрана воздушного бассейна при проектировании и эксплуатации судовых энергетических установок: монография / А. А. Иванченко, А. А. Иванченко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 327 с.

12. *Егоров Г. В.* Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река-море» плавания / Г. В. Егоров // Судостроение. — 2004. — № 6. — С. 10–16.

13. *Стешенков А. Л.* Перспектива развития отечественного рынка винторулевых колонок / А. Л. Стешенков // Судостроение. — 2014. — № 4. — С. 54–55.

14. *Даниловский А. Г.* Оптимизация судового пропульсивного комплекса: монография / А. Г. Даниловский, М. А. Орлов, И. А. Боровикова. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2007. — 175 с.

15. *Китаев М. В.* Некоторые аспекты проектирования движительных комплексов судов с несколькими режимами движения / М. В. Китаев, С. В. Антоненко // Мореходство и морские науки-2008: избранные доклады Первой Сахалинской региональной морской науч.- техн. конф. / под ред. В. Н. Храмушина. — Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. — С. 52–62.

16. *Китаев М. В.* Общие положения и подход к решению задачи выбора пропульсивного комплекса для судов с несколькими режимами движения / М. В. Китаев, С. В. Антоненко // Материалы VII Международной науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока», Академия транспорта РФ. — Владивосток, 2007. — С. 12–14.

17. *Wilkman G.* Experience of Azipod Vessels in Ice / G. Wilkman, M. Arpiainen, M. Niini, T. Mattsson, F. Bercha, S. Bercha // Proceedings of the 7th International Conference on Performance of Ships and Structures in Ice. — ICETECH06-134-RF, 2006.

18. *Башуров Б. П.* Контроль вибрации винторулевых колонок морских судов / Б. П. Башуров, И. Н. Николаев, М. В. Гриценко, А. В. Брежнев // Судостроение. — 2011. — № 5. — С. 36–38.

19. *Николаев Н. И.* Винторулевые колонки современных морских буксиров / Н. И. Николаев, А. В. Брежнев, М. В. Гриценко // Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта: материалы четвертой региональной науч.-техн. конф. — Новороссийск: Морская государственная академия им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2005. — С. 172–174.

20. *Пашин В. М.* Оптимизация судов / В. М. Пашин. — Л.: Судостроение, 1984. — 296 с.

21. *Николаев Н. И.* Контроль вибрации винторулевых колонок речных и морских судов / Н. И. Николаев, А. В. Брежнев, И. Н. Николаев, М. В. Гриценко // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 1 (37). — С. 78–80.

22. *Решетов Н. А.* Обеспечение безопасности главных винторулевых колонок в нормативной и надзорной деятельности Регистра / Н. А. Решетов // Судостроение. — 2002. — № 1. — С 12–17.

23. *Иванченко А. А.* Выбросы парниковых газов как индикатор энергоэффективности судна / А. А. Иванченко, А. П. Петров, В. Н. Окунев // Тр. МНТК «Водный транспорт России: Инновационный путь развития», 6 – 7 октября 2010 г. Т. 2. — СПб.: СПГУВК, 2011. — С. 369–374.

24. Временное Руководство по добровольному подтверждению конструктивного индекса энергетической эффективности. MEPC.1/Circ.682. — 2009.

25. ZF Marine Krimpen b.v. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.hrp.nl/ (дата обращения – 20.06.16).

26. ABB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://new.abb.com/ (дата обращения – 20.06.16).

27. *Векслярв В. Я.* Поиск путей совершенствования конструкции движителей и пропульсивных систем боевых кораблей и судов / В. Я. Векслярв // Материалы 3-й международной конференции по морским интеллектуальным технологиям. Моринтех. — СПб., 1999. — С. 31–38.

28. *Даниловский А. Г.* Автоматизированное проектирование судовых энергетических установок: учебное пособие / А. Г. Даниловский. — СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2006. — 206 с.

29. *Kim S.-E.* Model Tests on Propulsion Systems for Ultra Large Container Vessel / S.-E. Kim, S.-H. Choi, T. Veikonheimo // The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.

30. Wärtsilä [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.Wartsila.com (дата обращения — 20.06.16).

31. Excellence in propulsion: news from the Kamewa Group. — Kristinehamn: Kamewa Group, 1997 – 1998. — No. 1 – no. 4. — 25 p.

32. Demonstration and spin-off the Integral Motor Propeller Propulsion System // Proceedings, 1994, Technical Innovation Symposium, 7 – 9 September. — 1994. — Pp. 109–124.

33. *Pustoshny A. V.* Azipod propeller blade cavitation observations during ship manoeuvring / A. V. Pustoshny, S. V. Kaprantsev // 4th Int. Symposium on Cavitation (CAV'2001), Pasadena, USA. — 2001. — Pp. 1–8.

34. *Ghassemi H.* Comparison of hydrodynamic characteristics on two ship propulsors (PRS And Azipod) / H. Ghassemi, M. Iranmanesh // Iranian Journal of Science and Technology. — 2008. — Vol. 32. — No. B4. — Pp. 401–413.

35. *Strand J. P.* Compact azipod propulsion on DP supply vessels / J. P. Strand, T. Lauvdal, A. K. Ådnanes, A. AS // DP Conference, Houston, TX. — 2001. — Pp. 1–8.

36. *Tiainen L.* Simplifying Energy Efficiency [Электронный ресурс] / L. Tiainen, T. Jehkonen, J. F. Hansen. — Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/196daded74689feac1257a8a003ca642/ABB%20Generations_27%20Simplifying%20energy%20efficiency.pdf (дата обращения – 20.06.16).

37. *Nowicki J.* Stopping of Ships Equipped with Azipods / J. Nowicki // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2014. — Vol. 8. — nr 3. — Pp. 373–376. DOI: 10.12716/1001.08.03.07.

38. *Hanninen S.* Development of Azipod Propulsion for High Power Arctic Offshore Vessels / S. Hanninen, T. Heideman, E. Tenhunen // OTC Arctic Technology Conference, 3-5 December, Houston, Texas, USA. — Offshore Technology Conference, 2012. DOI: 10.4043/23775-MS.

39. *Andryushin A. V.* "Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions / A. V. Andryushin, S. Hänninen, T. Heideman // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. — Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013.

40. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.rolls-royse.com (дата обращения – 20.06.16).

41. *Ghassemi H.* Computational hydrodynamic analysis of the propeller–rudder and the AZIPOD systems / H. Ghassemi, P. Ghadimi // Ocean Engineering. — 2008. — Vol. 35. — Is. 1. — Pp. 117–130. DOI:10.1016/j.oceaneng.2007.07.008.

42. *Frongillo D. L.* Propulsion solutions for the cruise industry: A comparison between conventional shaftline propulsion and Azipod® propulsion: Master thesis / D. L. Frongillo. — Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011. — 36 p.

43. *Bolvashenkov I.* Promising ships propulsion systems with electric motion and steering gondolas / I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, A. Rubinraut, V. V. Romanovskiy // Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

44. *Pereira N. N.* A Diagnostic of Diesel-Electric Propulsion for Ships / N. N. Pereira // Ship Science & Technology. — 2007. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–42.

45. *Katelieva E.* Measures for improvement of energy efficiency of ships / E. Katelieva // Journal of Marine Technology & Environment. — 2012. — Vol. 1. — Pp. 59–66.

46. *Juurmaa K.* The development of the double acting tanker for ice operation / K. Juurmaa, T. Mattsson, N. Sasaki, G. Wilkman // Proceedings of the 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. — 2002. — С. 24–28.

47. *Bolvashenkov I.* Possible Ways to Improve the Efficiency and Competitiveness of Modern Ships with Electric Propulsion Systems / I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, A. Rubinraut, V. V. Romanovskiy // 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). — IEEE, 2014. — С. 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.

48. *Baniela S. I., Varela P. L., Rodríguez E. M.* Concept and operation mode of the advanced electronic control system of the azimuth propellers in tugs / S. I. Baniela, P. L. Varela, E. M. Rodríguez // Journal of Maritime Research. — 2005. — Vol. 2. — No. 3. — Pp. 3–20.

49. *Keinonen A.* Azimuth and multi purpose icebreaker technology for arctic and non-arctic offshore / A. Keinonen, P. Lohi // The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.

50. *Dordea S.* Electric drives for azimuth propulsors / S. Dordea, E. Zburlea // Analele Universitatii Maritime Constanta. — 2011. — Vol. 11. — Is. 14. — Pp. 177–184.

51. *Ye G.* Application of Azipod Electrical Propulsion System [J] / G. Ye, L. Shen // Shanghai Shipbuilding. — 2007. — Vol. 1. — Pp. 19–21.

52. *Яковлев А. Ю.* Метод расчета и исследование движителей с гребными винтами противоположного вращения / А. Ю. Яковлев // Судостроение. — 2008. — № 2. — С. 32–35.

53. SCHOTTEL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.Schottel.de (дата обращения – 20.06.16).

REVIEW OF EXPERIENCE IMPROVEMENT DESIGNS AND PROPULSION SYSTEMS IN MODERN SHIPBUILDING

This article gives an analysis of the prerequisites for improving the design of modern propulsive complexes ships reserves of traditional design concepts, designs and experience of steering columns with electrical and mechanical drive, performed a generalization of experience in designing, installation and technical operation. It is shown that the improvement in the complex hydrodynamic vessel lie considerable reserves to enhance its energy efficiency. The attention that the traditional propulsion system engine-transmission-shafting-propulsor with fixed and controllable pitch propellers, having undergone improvements, store-by its position mainly on large-capacity ocean-going ships with the main two-stroke engines, where their efficiency It remains high. A review of the market used in the domestic and foreign shipbuilding companies RMC ABB Marine, Roll-Royce OY Ab, Schottel, Steerprop et al. Formulated conclusions and recommendations for further improvement of propulsion systems.

Keywords: ship power plants (SPP), the propulsion system, propeller, controllable pitch propeller (CPP), fixed pitch propeller (FPP), azimuth column.

REFERENCES

1. Prilozhenie 6 k MARPOL 73/78. Morskoj registr sudohodstva, 2011.

2. Bruk, M. A. *Rezhimy raboty sudovyh dizelej*. L.: Sudpromgiz, 1963.

3. Rzhepeckij, K. L., and A. A. Rihter. *Dizel v sudovom propulsivnom komplekse*. L.: Sudostroenie, 1978.

4. Golubev, N. V. *Proektirovanie jenergeticheskih ustanovok morskih sudov*. L.: Sudostroenie, 1980.

5. Kacman, F. M. *Jekspluatacija propulsivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.

6. Kulibanov, Ju. M., P. A. Malyj, and V. V. Saharov. *Jekonomichnye rezhimy raboty sudovyh jenergeticheskih ustanovok*. M.: Transport, 1987.

7. Kamkin, S. V., I. V. Voznickij, and V. P. Shmelev. *Jekspluatacija sudovyh dizelej*. M.: Transport, 1990.

8. Rumb, V. K., G. V. Jakovlev, G. I. Sharov, V. V. Medvedev, and M. A. Minasjan. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki. Chast I. sudovye dizelnye jenergeticheskie ustanovki*. SPb.: MGTU, 2006.

9. Artjushkov, L. S., A. Sh. Achkinadze, and A. A. Ruseckij. *Sudovye dvizhiteli. Uchebnik dlja vuzov*. L.: Sudostroenie, 1988.

10. Artemonov, G. A., V. P. Voloshin, Ju. V. Zaharov, and A. Ja. Shkvar. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki*. L.: Sudostroenie, 1988.

11. Ivanchenko, A. A., and A. A. Ivanchenko. *Ohrana vozdushnogo bassejna pri proektirovanii i jekspluatacii sudovyh jenergeticheskih ustanovok: monografija*. SPb.: Izd-vo Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2014.

12. Egorov, G. V. "Selection of main components of «river-sea» sailing dry cargo ships and oil tankers." *Shipbuilding* 6 (2004): 10–16.

13. Steshenkov, A. L. "Development trends for domestic market of rudder propellers." *Shipbuilding* 4 (2014): 54–55.

14. Danilovskij, A. G., M. A. Orlov, and I. A. Borovikova. *Optimizacija sudovogo propulsivnogo kompleksa: monografija*. SPb.: Izd. centr SPbGMTU, 2007.

15. Kitaev, M. V., and S. V. Antonenko. "Nekotorye aspekty proektirovanija dvizhitelnyh kompleksov sudov s neskolkimi rezhimami dvizhenija." *Morehodstvo i morskie nauki-2008: izbrannye doklady Pervoj Sahalinskoj regionalnoj morskoj nauch. tehn. konf.* Juzhno-Sahalinsk: SahGU, 2008: 52–62.

16. Kitaev, M. V., and S. V. Antonenko. "Obshhie polozhenija i podhod k resheniju zadachi vybora propulsivnogo kompleksa dlja sudov s neskolkimi rezhimami dvizhenija." *Materialy VII mezhdunarodnoj nauch. prakt. konf. «Problemy transporta Dalnego Vostoka», Akademija transporta RF*. Vladivostok, 2007: 12–14.

17. Wilkman, G., M. Arpiainen, M. Niini, T. Mattsson, F. Bercha, and S. Bercha. "Experience of Azipod Vessels in Ice." *Proceedings of the 7th International Conference on Performance of Ships and Structures in Ice*. ICETECH06-134-RF, 2006.

18. Bashurov, B. P., I. N. Nikolaev, M. V. Gritsenko, and A. V. Brezhnev. "Seagoing ships rudder propellers vibration monitoring." *Shipbuilding* 5 (2011): 36–38.

19. Nikolaev, N. I., A. B. Brezhnev, and M. V. Gricenko. "Vintorulevye kolonki sovremennyh morskih buksirov." *Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tehnicheskoj i kommercheskoj jekspluatacii morskogo*

transporta: materialy chetvertoj regionalnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii. Novorossijsk: Morskaja gosudarstvennaja akademija im. adm. F.F. Ushakova, 2005: 172–174.

20. Pashin, V. M. *Optimizacija sudov*. L.: Sudostroenie, 1984.

21. Nikolaev, N. I., A. V. Brezhnev, I. N. Nikolaev, and M. V. Gricenko. "Kontrol vibracii vintorulevyh kolonok rechnyh i morskih sudov." *River transport (XXIst century)* 1(37) (2009): 78–80.

22. Reshetov, N. A. "Provision of main rudder-propellers safety in normative and supervision activities of Register." *Shipbuilding* 1 (2002): 12–17.

23. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and V. N. Okunev. "Vybrosy parnikovyh gazov kak indikator jenergojeffektivnosti sudna." *Tr. MNTK «Vodnyj transport Rossii: Innovacionnyj put' razvitija», 6 – 7 oktjabrja 2010 g. Tom 2*. SPb.: SPGUVK, 2011: 369–374.

24. Vremennoe Rukovodstvo po dobrovolnomu podtverzhdeniju konstruktivnogo indeksa jenergeticheskoj jeffektivnosti. MEPC.1/Circ.682. 2009.

25. ZF Marine Krimpen b.v. Web. 20 June 2016 < http://www.hrp.nl/>.

26. ABB. Web. 20 June 2016 <http://new.abb.com/>.

27. Veksljar, V. Ja. "Poisk putej sovershenstvovanija konstrukcii dvizhitelej i pro-pulsivnyh sistem boevyh korablej i sudov." *Materialy 3-ej mezhdu-narodnoj konferencii po morskim intellektual'nym tehnologijam*. *Morinteh*. SPb., 1999: 31–38.

28. Danilovskij, A. G. *Avtomatizirovannoe proektirovanie sudovyh jenergeticheskih ustanovok: Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd. SPbGMTU, 2006.

29. Kim, Se-Eun, Soon-Ho Choi, and Tomi Veikonheimo. "Model Tests on Propulsion Systems for Ultra Large Container Vessel." *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.

30. Wärtsilä. Web. 20 June 2016 < http://www.Wartsila.com>.

31. *Excellence in propulsion: news from the Kamewa Group*. Kristinehamn: Kamewa Group, 1997–1998. No. 1–no. 4.

32. "Demonstration and spin-off the Integral Motor Propeller Propulsion System." *Proceedings, 1994, Technical Innovation Symposium, 7-9 September*. 1994: 109–124.

33. Pustoshny, A. V., and S. V. Kaprantsev. "Azipod propeller blade cavitation observations during ship manoeuvring." *4th Int. Symposium on Cavitation (CAV'2001), Pasadena, USA*. 2001: 1–8.

34. Ghassemi, H., and M. Iranmanesh. "Comparison of hydrodynamic characteristics on two ship propulsors (PRS And Azipod)." *Iranian Journal of Science and Technology* 32.B4 (2008): 401–413.

35. Strand, Jann Peter, T. Lauvdal, A. K. Ådnanes, and A. AS. "Compact azipod propulsion on DP supply vessels." *DP Conference, Houston, TX*. 2001: 1–8.

36. Tiainen, L., T. Jehkonen, and J. F. Hansen. *Simplifying Energy Efficiency*. Web. 20 June 2016 <https://library.e.abb.com/public/196daded74689feac1257a8a003ca642/ABB%20Generations_27%20Simplifying%20energy%20efficiency.pdf>.

37. Nowicki, J. "Stopping of Ships Equipped with Azipods." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.3 (2014): 373–376. DOI: 10.12716/1001.08.03.07.

38. Hanninen, Samuli, Torsten Heideman, and Erno Tenhunen. "Development of Azipod Propulsion for High Power Arctic Offshore Vessels." *OTC Arctic Technology Conference, 3-5 December, Houston, Texas, USA*. Offshore Technology Conference, 2012.

39. Andryushin, A. V., S. Hänninen, and T. Heideman. ""Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2013.

40. ROLLS-ROYSE. Web. 20 June 2016 < http://www.rolls-royse.com>.

41. Ghassemi, Hassan, and Parviz Ghadimi. "Computational hydrodynamic analysis of the propeller–rudder and the AZIPOD systems." *Ocean Engineering* 35.1 (2008): 117–130. DOI:10.1016/j.oceaneng.2007.07.008

42. Frongillo, D. L. Propulsion solutions for the cruise industry: A comparison between conventional shaftline propulsion and Azipod® propulsion. Master thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.

43. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor 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. DOI: 10.1109/EVER.2014.6844086.

44. Pereira, Newton Narciso. "A Diagnostic of Diesel-Electric Propulsion for Ships." *Ship Science & Technology* 1.2 (2007): 27–42.

45. Katelieva, Elena. "Measures for improvement of energy efficiency of ships." *Journal of Marine Technology & Environment* 1 (2012): 59–66.

46. Juurmaa, Kimmo, Tom Mattsson, Noriyuki Sasaki, and Göran Wilkman. "The development of the double acting tanker for ice operation." *Proceedings of the 17th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*. 2002: 24–28.

47. Bolvashenkov, Igor, Hans-Georg Herzog, Alexander Rubinraut, and Victor V. Romanovskiy. "Possible Ways to Improve the Efficiency and Competitiveness of Modern Ships with Electric Propulsion Systems." *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2014: 1–9. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007120.

48. Baniela, Santiago Iglesias, Pablo López Varela, and Enrique Melón Rodríguez. "Concept and operation mode of the advanced electronic control system of the azimuth propellers in tugs." *Journal of Maritime Research* 2.3 (2005): 3–20.

49. Keinonen, Arno, and Paavo Lohi. "Azimuth and multi purpose icebreaker technology for arctic and non-arctic offshore." *The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.

50. Dordea, Stefan, and Elena Zburlea. "Electric drives for azimuth propulsors." *Analele Universitatii Maritime Constanta* 11.14 (2011): 177–184.

51. Ye, Guo-quan, and Lin-tao Shen. "Application of Azipod Electrical Propulsion System [J]." *Shanghai Shipbuilding* 1 (2007): 19–21.

52. Yakovlev, A. Yu. "Method of analysis and investigation of propulsive devices with counter-rotating propellers." *Shipbuilding* 2 (2008): 32–35.

53. SCHOTTEL. Web. 20 June 2016 < http://www.Schottel.de>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Иванченко Александр Андреевич — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *prof_ivanchenko@mail.ru, IvanchenkoAA@gumrf.ru*	*Ivanchenko Alexander Andreevich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *prof_ivanchenko@mail.ru, IvanchenkoAA@gumrf.ru*
Шишкин Валерий Александрович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *valshish2007@gmail.com, kaf_seu@gumrf.ru*	*Shishkin Valery Alexandrovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *valshish2007@gmail.com, kaf_seu@gumrf.ru*
Окунев Василий Николаевич — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *okunew@mail.ru*	*Okunev Vasiliy Nikolaevich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *okunew@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-176-183
УДК 621.43:629.5

В. Н. Кучеров

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ДВУХТАКТНОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОРШНЕМ

По результатам эксплуатации дизелей ZH40/48 выявлены преобладающие скорости изнашивания цилиндровых втулок в районе продувочных окон, которые определяют их ресурс. Проведены термоме-

трические исследования втулки. Зафиксированы температуры, превышающие допускаемые значения. Выполнены расчеты теплового состояния втулки в поясе окон. Предложены варианты модернизации цилиндровой втулки и схемы ее охлаждения. Произведен расчет напряжений в районе уменьшения толщины теплопередающих стенок. Получено одобрение Регистра СССР на модернизацию цилиндровых втулок и схемы охлаждения. Выполнена модернизация цилиндровых втулок в двух вариантах. Проведены термометрические испытания втулок в составе двигателя в рейсе. Достигнуто уменьшение температуры стенок, эквивалентное снижению нагрузки дизеля на 30 %. Полученный уровень температур позволит обеспечить поддержание стабильной масляной пленки на перемычках окон и запас работоспособности при эксплуатационном ухудшении технического состояния поршневой группы, турбокомпрессора и топливной аппаратуры.

Ключевые слова: судовой двигатель, цилиндровая втулка, продувочные окна, износ, исследование, тепловое состояние, механические напряжения, модернизация, испытания.

Вводная часть

Среднеоборотные дизели (СОД) различных фирм со своими конструкционными особенностями получили широкое распространение на судах в качестве главных и вспомогательных двигателей. В настоящее время при высокой степени наддува СОД имеют преимущественно четырехтактное исполнение, которое обеспечивает более благоприятные условия для работы пар трения «втулка – поршневые кольца – канавки поршня» при сопоставимых энергетических показателях.

Двухтактные тронковые СОД моделей ZH были впервые разработаны фирмой «Зульцер» во второй половине 70-х гг. прошлого столетия, дизели имеют внутриканальное охлаждение верхней части втулки, четырехклапанную прямоточную систему продувки с принудительным вращением поршня вокруг вертикальной оси. В дальнейшем дизели с вращением поршня, разработанные для двухтактных ДВС, стали использоваться и на различных четырехтактных дизелях, разработанных фирмой «Зульцер». До настоящего времени фирма «Зульцер» успешно использует этот принцип на своих новых четырехтактных дизелях ZAS с увеличенным ходом поршня. Конструкционные особенности дизелей серии ZH, ZL, ZV, ZAS описаны в работах [1] – [5]. Показано тепловое состояние и механическое напряжение на поршнях по результатам исследований фирмы «Зульцер». По данным технической службы Дальневосточного пароходства, интенсивное изнашивание перемычек окон двигателей ZH наблюдалось в пароходствах Балтийского и Мурманского бассейнов. Исследования теплового состояния втулок в верхнем поясе и в районе продувочных окон не выполнялись.

В Дальневосточном бассейне наряду с четырёхтактными двигателями эксплуатируется большое количество двухтактных СОД типа ZH 40/48 и ZL 40/48 фирмы «Зульцер», которые установлены на ледоколах типа «Ермак» и «Капитан Хлебников». Серия л/к «Капитан Хлебников» эксплуатируется в Балтийском и Мурманском бассейнах. Только на судах типа «Ермак» установлено девять двигателей 12ZH 40/48 номинальной мощностью по 3383 кВт и n = 380 мин$^{-1}$ с общим числом цилиндров — 109 единиц. На ледоколах типа «Капитан Хлебников» установлены шесть главных двигателей под маркой 9ZL40/48 с p_e = 3050 кВт при номинальной частоте вращения 430 мин$^{-1}$. Дизель модели ZL конструктивно аналогичен модели ZH, но имеет более высокую форсировку (на 20 %), в основном за счёт увеличения частоты вращения с 380 до 430 мин$^{-1}$ соответственно.

Отмечено, что на всех двигателях л/к «Ермак» в первые 10 тыс. ч эксплуатации особых замечаний в работе цилиндропоршневой группы (ЦПГ) не наблюдалось, кроме периодической замены поршневых колец из-за их износа. После наработки 13,8 тыс. ч почти на всех дизелях стал выявляться износ цилиндровых втулок в районе продувочных окон, преимущественно со стороны газовыпуска (правый борт). При наработке, близкой к 17 тыс. ч, участились поломки колец в связи с большим износом канавок в головках поршней, а в последующем — сильные повреждения и изломы перемычек по тем же причинам. Тщательное обследование ряда втулок показало, что помимо изнашивания перемычек окон с одинаковой интенсивностью изнашивается и верхний пояс

цилиндровых втулок. Поскольку допускаемый износ втулки в верхнем поясе составляет 1,8 мм, а в районе окон только 0,6 мм, ресурс цилиндровой втулки определяет именно зона перемычек нижнего пояса. Износы ассиметричны и имеют большее значение в плоскости «борт – борт», что закономерно для тронкового дизеля.

Выполненный анализ характера изнашивания цилиндровых втулок на л/к «Адмирал Макаров» и «Капитан Хлебников» показали общность эпюр износа (рис. 1). После наработки 23 тыс. ч на л/к «Ермак» возникла потребность в замене 40 цилиндровых втулок, износ которых в районе окон значительно превышал допустимый и в ряде случаев приближался к 2 мм.

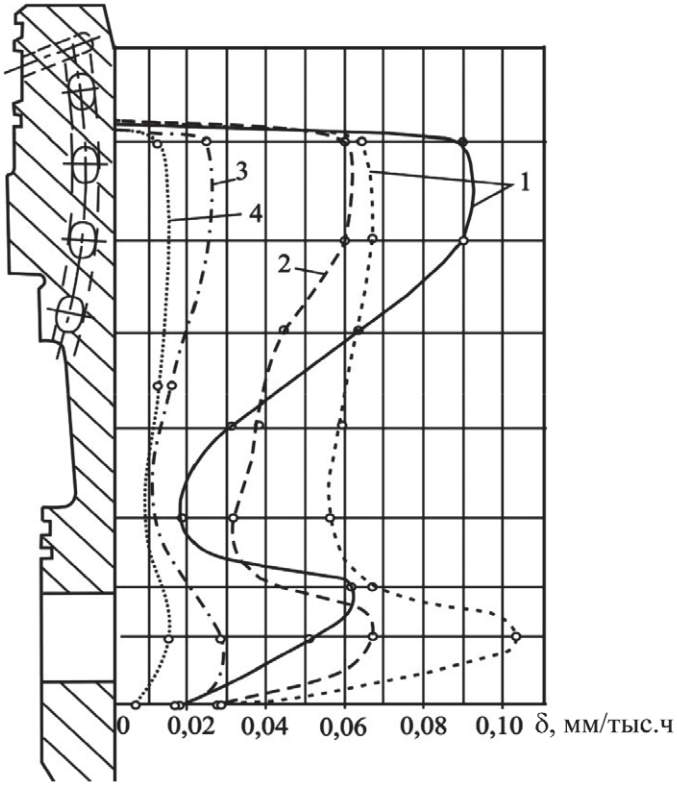


Рис. 1. Характер износа цилиндровых втулок по высоте в плоскости «борт — борт»:
1 — л/к «Ермак», τ = 21800 ч; *2* — л/к Макаров»;
3 — л/к «Капитан Хлебников», ГД2, τ = 14500 ч; ГД6, τ = 13300 ч;
4 — л/к «Капитан Хлебников», ГД3, ГД6, τ = 6000 ч

Проведенные термометрические измерения и расчеты температурных полей на цилиндровой втулке л/к «Ермак» показали рабочие температуры на перемычках окон на уровне 135 °С (ГД2, цилиндр № 7), которые значительно превышают значения температур в этой зоне для судовых МОД с прямоточно-клапанной продувкой. Считается, что температура втулки в районе перемычек окон, согласно условиям стабильности масляной пленки и отсутствия интенсивного изнашивания, не должна превышать 120 °С [6]. Повышению температуры втулки у окон способствует большое термическое сопротивление теплопроводности массивного пояса у окон, односторонний подвод и отсутствие организованного циркуляционного контура охлаждающей жидкости. Старение двигателя, турбонагнетателя, износ втулок, канавок поршней, тронков и поршневых колец способствуют активизации процессов изнашивания в зоне окон, которые резко прогрессировали после наработки 12 – 14 тыс. ч.

Основная часть

Анализ особенностей конструкции втулки и зафиксированные при измерениях на л/к «Ермак» высокие значения температур в зоне окон, полученные моделированием температурных

полей [7], [8] на втулке в поясе интенсивных износов в районе окон, доказали истинность идеи о вероятной тепловой перегрузке втулки в районе перемычек продувочных окон, которая интенсифицируется по мере увеличения зазоров в цилиндре, канавках поршней и износах колец. Специфическое влияние на тепловое состояние втулки тронковых двухтактных ДВС у окон создает *эффект зазора*, который возрастает по мере изнашивания втулки и тронка (рис. 2). В момент открытия первым поршневым кольцом кромки продувочных окон нормальная сила N у правой модели прижимает поршень к левому борту втулки, увеличивая сечение зазора и рост теплового потока с правого борта, обусловленного прорывом газа. Сдувание масляной пленки, асимметричный рост температуры, деформация втулки и перемычек приводят к интенсификации износов втулок у окон с правого борта. Тепловое состояние втулки у окон определяется условиями как нагружения, так и охлаждения. Односторонний подвод жидкости турбулизирует поток также с правого борта. Далее поток направляется по диагональным траекториям к охлаждающим каналам левого борта, где могут появляться участки с различной, в том числе низкой, скоростью движения, которые провоцируют появление кавитационных разрушений на втулке с левого борта над верхним резиновым уплотнительным кольцом и в его канавке.

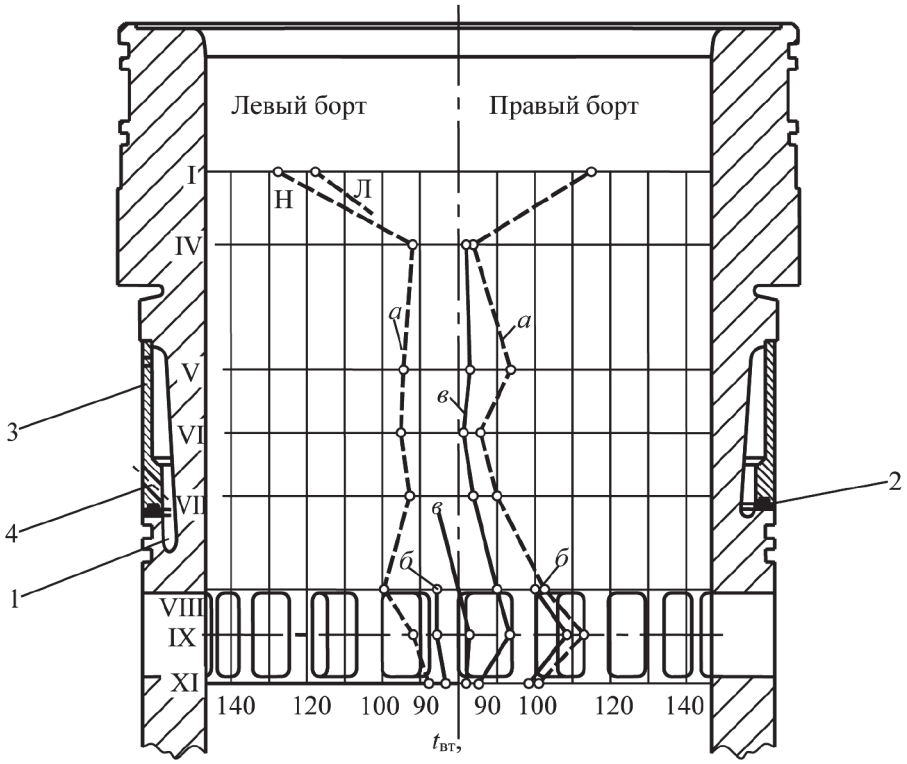


Рис. 2. Варианты модернизации втулок и температурные поля:
1 — полная модернизация; *2* — частичная модернизация; *3* — вставка; *4* — направляющие каналы;
а — температурное поле штатной втулки цилиндра № 11;
б — поле температур втулки цилиндра № 6 — частичная модернизация;
в — полная модернизация втулки № 11;
Л — значение температуры штатной втулки в районе остановки первого кольца в ВМТ (сечение «левый борт»); *Н* – сечение «нос»

Как показали измерения, значительная асимметрия температуры по правому борту не компенсируется большей турбулизацией потока охлаждающей жидкости в силу большого термического сопротивления стенки окон. Для уменьшения тепловой напряженности втулки были разработаны и выполнены два проекта модернизации втулок: *основной* с уменьшением толщины стенки над окнами на 32 мм и организацией направленного кругового движения жидкости над окнами (см. рис. 2, поз. *1*, *3*), втулка цилиндра № 11 [9] – [11] и *упрощенный*. Упрощенный вариант (ча-

стичная модернизация) выполнен на втулке цилиндра № 6 (см. рис. 2, поз. *2*). В этом проекте нет проточки втулки над окнами, имеется только цилидрическая вставка (см. рис. 2, поз. *3*), создающая только эффект турбулизации и выравнивания скорости потока охлаждающей жидкости при ее круговом движении в полости над окнами, который должен предотвратить развитие кавитации со стороны левого борта. В результате в упрощенном варианте частичной модернизации получено уменьшение температуры на перемычках со стороны правого борта на 3 °С и левого — на 14 °С. В обоих вариантах модернизации вокруг пояса окон устанавливается разработанная автором цилиндрическая вставка (А. С. SU 1523699 А1) с равномерно расположенными по окружности наклонными каналами для закручивания и равномерной активизации потока в поясе над окнами.

Обсуждение основных результатов исследования

Контрольная штатная втулка № 7 была оснащена в период докового ремонта и испытана до проведения большого текущего ремонта. Ввиду досрочного выхода л/к «Ермак» в Арктику, установить модернизированные втулки не удалось. После завершения арктической навигации на Владивостокском судоремонтном заводе был выполнен большой ремонт дизелей с заменой головок поршней и восстановлением зазоров в канавках, а также ревизией турбокомпрессоров и топливной аппаратуры, который существенно изменил температуры втулок у окон. В результате проведенного на Владивостокском судоремонтном заводе ремонта на контрольной втулке № 7 средняя температура в восьмом поясе уменьшилась на 17 °С с левого борта и на 19 °С со стороны зазора. В верхнем поясе втулки падение температуры после ремонта не превышало 3 °С в связи с сильным переохлаждением штатных втулок (рис. 3).

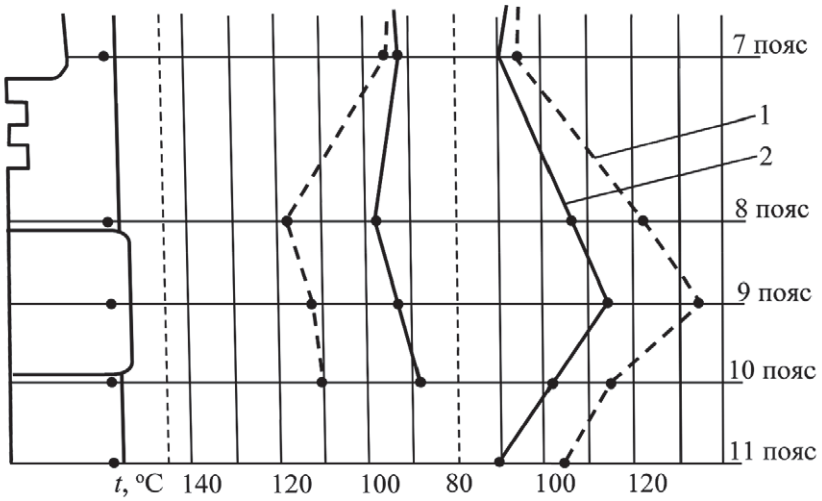


Рис. 3. Характер изменения температуры контрольной втулки цилиндра до ремонта и после ремонта:
7-й пояс — температуры цилиндровых втулок на уровне установки цилиндрической вставки;
8-й пояс — температуры цилиндровых втулок над продувочными окнами;
9-й пояс — то же центру перемычек продувочных окон; 10-й пояс — то же под продувочными окнами;
11-й пояс — то же в положении остановки первого поршневого кольца в НМТ

Основные термометрические и тензометрические (в зонах проточек) испытания проводились на л/к «Ермак» в зимнем рейсе в порт Анадырь после большого ремонта ЦПГ. В целом термометрические измерения выполнялись на пяти втулках ГД № 2 (правая модель) в девяти поясах по высоте втулки с общим числом установленных термопар около 90 шт., где пояс 1 — положение первого кольца в ВМТ, пояс 4 — четвертое кольцо в ВМТ и т. д. В зависимости от решаемой задачи устанавливались термопары по сокращенной или полной схеме (правый борт, левый борт, нос, корма).

Штатная втулка цилиндра № 7 (контрольная) отработала к этому времени 24,4 тыс. ч и имела износ в верхнем поясе «борт – борт» 1,1 мм, в плоскости «нос – корма» — 0,75 мм и в зоне окон — 1,0 мм, соответственно в плоскости «нос – корма» — 0,75, 0,22, 0,70 мм. Цилиндр № 11 — полная

модернизация втулки с проточкой 32 мм у окон — отработала 23,4 тыс. ч. Износ в верхнем поясе «по ходу» составил 2,15 мм, «по оси» — 1,25; в поясе окон «по ходу» — 1,15 – 1,45, «по оси» — 0,7 – 1,1 мм. Цилиндр № 6 (частичная модернизация) — втулка отработала до модернизации около 23,4 тыс. ч, износ в верхнем поясе «по ходу» составил 1,3 мм, «по оси» — 0,4 мм, в районе окон — 0,67 и 0,50 мм соответственно. Цилиндр № 10 2Д № 3 л/к «Адмирал Макаров» — левая модель дизеля. Цилиндр № 12 — импортная новая втулка с уменьшенным числом охлаждающих сверлений.

Цилиндровые втулки построечного комплекта в верхнем поясе имели 44 тангенциальных охлаждающих канала диаметром 12 мм с неоправданно малым шагом (около 35 мм). Значения температур в районе первого кольца в ВМТ (пояс 1) составили 115, 122, 128 °С. Минимальное значение – 105 °С, максимальное (единичное) — 130 °С в режиме номинальной нагрузки. Низкие температуры (около 100 °С) в режиме $0{,}9p_{ен}$ предрасполагают втулки к кислотной коррозии и росту потерь на трение в связи с повышенной вязкостью масла в паре трения.

Новое поступление втулок при замене сорока единиц имели уже 36 каналов с увеличением шага сверлений в 1,22 раза при неизменной активной толщине стенок. На одной из таких втулок (цилиндр № 12) были установлены термопары в районе первого и четвертого кольца при положении поршня в ВМТ.

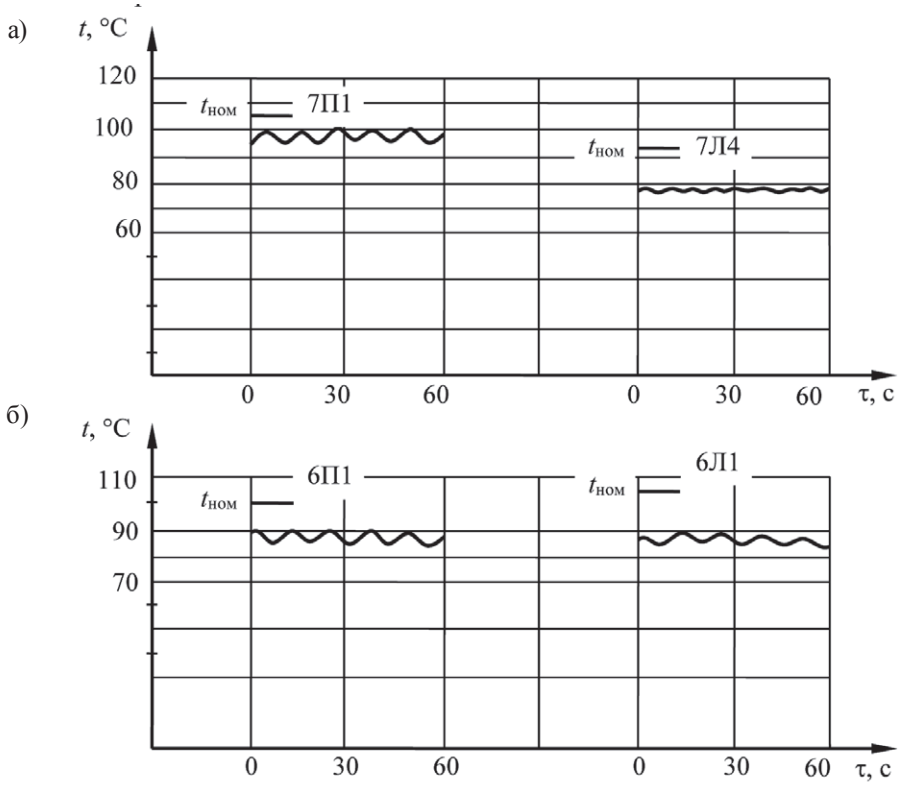


Рис. 4. Характер изменения температуры втулок цилиндров № 7 и 6
а — в верхнем поясе (первое кольцо в ВМТ); *б* — 7Л4 в районе кольца № 4 в ВМТ

Как показали измерения, значения температуры в верхнем поясе не отличаются от соответствующих значений штатных втулок, шаг сверления остается малым. Сопутствующими факторами низких температур являются идеальная чистота охлаждающих сверлений с благоприятной для коэффициента теплоотдачи шероховатостью каналов и минимальные зазоры в паре «втулка – поршень». Вращающийся поршень совершает 6 – 11 об/мин вокруг вертикальной оси у различных дизелей. Технические решения о принудительном вращении поршня отразились на идеально ровном распределении температур, напряжений и деформаций по окружности зеркала без обычных «выбегов» температуры на втулке в районе замков кольца и при схождении замков на всех дизелях других типов (рис. 4).

Выводы

1. Измерения, проведенные на модернизированных втулках, показали уменьшение температуры стенки на перемычках в среднем на 15 С, что эквивалентно уменьшению нагрузки дизеля на 30 %. Это позволяет компенсировать возрастающий тепловой поток из-за ухудшения состояния деталей ЦПГ по мере их изнашивания и снижения тепловой напряженности в условиях резкого нагружения дизелей при работе ледокола в тяжелых льдах.

2. Вращающийся поршень проводит во вращательное движение поршневые кольца. В результате локальный перегрев втулки, обусловленный прорывом газов через замок кольца, и связанные с этим температурные напряжения и деформации цилиндровой втулки исключаются.

3. Вращение колец снижается также тепловую нагрузку колец в районе замка, увеличивая рабочие характеристики материала колец, повышает стабильность масляной пленки в паре трения и уменьшает скорость изнашивания втулки и колец.

4. Выравнивание скорости движения жидкости в круговой полости под цилиндрической вставкой втулки должно устранить причины кавитационных разрушений втулки с левого борта (на противоположной стороне подвода охлаждающей жидкости) и в районе уплотнительных канавок под резиновыми кольцами.

5. Для повышения качества рабочего процесса и уменьшения опасности сернокислотной коррозии на режимах холостого хода и долевых нагрузках следует повышать до максимальных значений температуру продувочного воздуха и охлаждающей воды.

6. Повышение температуры охлаждающей жидкости с 50 до 60 °С увеличивает температуру в поясе 1 на 10 – 12 °С, а по перемычкам окон в поясе 9 — на 4 °С у штатных втулок.

7. Повышение температуры продувочного воздуха с 20 до 52 °С увеличивает температуру втулок в поясе 1 и поясе 9 по центру перемычки на 10 – 12 °С.

8. Как показали исследования и расчеты, безопасную в отношении кислотной коррозии температуру около 160 °С в верхнем поясе можно получить при применении 28 простых наклонных каналов диаметром 12 мм, вместо 44 сложных тангенциальных. Этот проект был одобрен Регистром СССР, а Находкинский судоремонтный завод начал подготовку к производству втулок, но все работы закончились с наступлением «перестройки».

9. По результатам исследований получено авторское свидетельство на модернизацию цилиндровой втулки и схему ее охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Конкс Г. А.* Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учебн. пособие / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005. — 512 с.

2. *Возниций И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий. — СПб.: Моркнига, 2007. — 285 с.

3. *Конкс Г. А.* Поршневые ДВС. Современные принципы конструирования: учеб. пособие / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. — 560 с.

4. *Возницкий И. В.* Современные судовые среднеоборотные двигатели: учеб. пособие / И. В. Возницкий. — СПб., 2003. — 138 с.

5. *Чайнов Н. Д.* Конструирование двигателей внутреннего сгорания: учебник / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков. — М.: Машиностроение, 2011. — 496 с.

6. *Камкин С. В.* О влиянии температур зеркала цилиндра на интенсивность износа втулок судовых дизелей с турбонаддувом / С. В. Камкин // Судовые силовые установки. — 1968. — № 7. — С. 54–56.

7. *Чайнов Н. Д.* Численное моделирование движения жидкости в полости охлаждения крышки цилиндра среднеоборотного дизеля / Н. Д. Чайнов, Л. Л. Мягков, Н. С. Маластовский // Грузовик. — 2015. — № 5. — С. 4–8.

8. *Руссинковский С. Ю.* 3-D моделирование граничных условий теплообмена при расчете теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // С. Ю. Руссинковский, Н. Д. Чайнов // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 3–8.

9. *Кучеров В. Н.* Тепловая напряжённость цилиндровой втулки дизеля ZH40/48 в поясе продувочных окон / В. Н. Кучеров, М. В. Флорианская // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2011. — № 1. — С. 176–180.

10. *Шабров Н. Н.* Метод конечных элементов в расчётах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. — Л.: Машиностроение, 1983. — 212 с.

11. *Чайнов Н. Д.* Конечно-элементная модель анализа напряженно-деформированного состояния деталей, образующих газовый стык среднеоборотного дизеля, от монтажных нагрузок / Н. Д. Чайнов, А. Н. Краснокутский, А. В. Капшуков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2015. — № 11. — С. 72–91. DOI: 10.7463/1115.0825549.

INVESTIGATION HEAT LOAD AND MODERNIZATION CYLINDER LINER TWO STROKE MEDIUM SPEED DIESEL ENGINE WITH ROTATING PISTON

According service data excessive wearing rate was reviled on cylinder liners scavenging port's ZH40/48 diesels. Thermo investigation showed excessive temperature on scavenging ports area. Calculations of heat condition and mechanical stresses were worked out to make modernization cylinder liner and cooling system around scavenging ports. Measurement of temperature condition modificated cylinder liners showed reduce thermal load complied 30 % drop of engine power.

Keywords: diesel engine, cylinder liners, scavenging ports, wearing, investigation, heat condition, mechanical stress, thermal measurement, modernization, thermal loads.

REFERENCES

1. Konks, G. A., and V. A. Lashko. *Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Koncepcii konstruirovanija, analiz mezhdunarodnogo opyta. Uchebnoe posobie*. M.: Mashinostroenie, 2005.

2. Voznicij, I. V. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoranija*. SPb.: Morkniga, 2007.

3. Konks, G. A., and V. A. Lashko. *Porshnevye DVS. Sovremennye principy konstruirovanija: uchebnoe posobie*. Habarovsk: izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2006.

4. Voznickij, I. V. *Sovremennye sudovye sredneoborotnye dvigateli: uchebn. posobie*. SPb., 2003.

5. Chajnov, N. D., N. A. Ivashhenko, A. N. Krasnokutskij, and L. L. Mjagkov. *Konstruirovanie dvigatelej vnutrennego sgoranija. Uchebnik*. M.: Mashinostroenie, 2011.

6. Kamkin, S. V. "O vlijanii temperatur zerkala cilindra na intensivnost iznosa vtulok sudovyh dizelej s turbonadduvom." *Sudovye silovye ustanovki* 7 (1968): 54–56.

7. Chaynov, N. D., L. L. Myagkov, and N. S. Malastovsky. "Numerical modeling of the movement of liquid in a cavity of cooling of a cover of the cylinder of the sredneoborotny diesel." *Gruzovik* 5 (2015): 4–8.

8. Russinkovsky, S. Yu., and N. D. Chainov. "3-D Simulation of Heat Exchange Boundary Conditions as a Means of Piston Block Parts' Thermal Analysis." *Dvigatelestroyeniye* 4 (2013): 3–8.

9. Kucherov, V. N., and M. V. Florianskaya. "Heat condition zone of scavenging ports cylinder liner ZH40/48 diesel." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2011): 176–180.

10. Shabrov, N. N. *Metod konechnyh jelementov v raschjotah detalej teplovyh dvigatelej*. L.: Mashinostroenie, 1983.

11. Chainov, N. D., A. N. Krasnokutskii, and A. V. Kapshukov. "Finite Element Model to Analyze an Installation Load-based Stress-Strain State of the Parts Forming Gas Joint of a Medium-Speed Diesel Engine." *Science and Education of Bauman MSTU* 11 (2015): 72–91. DOI: 10.7463/1115.0825549.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кучеров Владимир Никанорович —
кандидат технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского»
Nadezkin@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kucherov Vladimir Nikanorovich —
PhD, professor.
Maritime state university named after adm. G. A. Nevelskoy
Nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2016 года.

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-184-192
УДК 656.61.052:621.396.6:530.1

В. В. Каретников,
Д. Ф. Миляков,
Я. Д. Милякова

ВЫБОР МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ГНСС ГЛОНАСС/GPS

В статье рассматриваются вопросы использования средств функциональных дополнений ГНСС в условиях Северного морского пути (СМП). Описаны основные принципы построения дифференциальных подсистем ГЛОНАСС/GPS, среди которых в зависимости от зоны покрытия условно выделены локальные, региональные и широкозонные. Отмечена важность повышения качества, обеспечения безопасности и надежности мореплавания в акватории СМП в связи с ожидаемой интенсификацией транспортных потоков, проходящих через арктическую судоходную магистраль, связанных с повышением роли СМП для перевозки минерального и углеводородного сырья из арктических регионов страны, разработка которых стремительно развивается в настоящее время. Выделены сравнительные преимущества и недостатки использования локальных и широкозонных дифференциальных подсистем в условиях Арктики. Выполнен анализ возможных ограничений в работе данных подсистем в условиях высоких широт и предлагаются способы их преодоления. Сделан вывод о том, что на СМП использование локальных дифференциальных подсистем представляется наиболее конструктивным решением.

Ключевые слова: функциональные дополнения ГНСС, СМП, контрольно-корректирующая станция, дифференциальные поправки.

Введение

Северный морской путь (СМП) является одним из важнейших элементов инфраструктуры экономического комплекса Крайнего Севера Российской Федерации. В береговой зоне и на шельфе арктических морей сосредоточены огромные запасы природных ресурсов. В настоящее время в районах Крайнего Севера добывается порядка 80 % углеводородов России, никель, олово, золото и прочие цветные металлы. Следует отметить, что существующие запасы газа и нефти руководство страны тесно связывает с её национальной безопасностью. Использование магистрали для транспортировки грузов выгодно как с логистической, так и с экономической точки зрения, что делает СМП альтернативой традиционным маршрутам, соединяющим европейские и североамериканские порты с портами Дальнего Востока и Азии.

Прогнозирование роста транспортной активности в Арктической зоне предполагает повышение роли СМП для перевозки минерального и углеводородного сырья из арктических регионов России, разработка которых в настоящее время стремительно развивается. Для обеспечения требуемого уровня безопасности и надежности перевозок на маршруте необходимо применение высокоточных методов местоопределения подвижных объектов, в том числе с использованием средств функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS. В данной статье рассматриваются особенности использования средств функциональных дополнений для навигационного обеспечения судоходства в условиях СМП.

Потенциал и предпосылки развития
Северного морского пути как судоходной магистрали

С логистической точки зрения СМП может рассматриваться как одна из основных судоходных магистралей России в Арктике. Проходя вдоль северных берегов России по морям Северного Ледовитого океана: Карскому морю, морю Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям, СМП соединяет европейские и дальневосточные порты России, а также устья судоходных рек Сибири, образуя единую национальную транспортную систему общей протяженностью более 37 000 км. Сейчас основные морские маршруты между портами Европы, Северной Америки и Дальнего Востока проходят через Суэцкий и Панамский каналы. Выбор СМП для осуществления грузоперевозок морем представляется как реальная альтернатива традиционным южным маршрутам, которая имеет ряд существенных преимуществ. В качестве одного из них следует отметить, в первую очередь, возможность значительно сократить расстояние, преодолеваемое судами, с соответствующей оптимизацией временных затрат на транспортировку грузов. СМП, являясь кратчайшим путем из Европы на Дальний Восток, позволяет сократить расстояние по сравнению с традиционными маршрутами почти в два раза. Так, например, расстояние от Санкт-Петербурга до Владивостока по СМП составляет 14 280 км, в то же время через Суэцкий канал — 23 200 км, а вокруг мыса Доброй Надежды протяженность маршрута составит 29 400 км [1]. Таким образом, перевозка груза из стран Азии в Европу при осуществлении плавания по СМП, как правило, занимает на 10 – 15 дней меньше стандартного маршрута, пролегающего через Суэцкий канал (рис. 1).



Рис. 1. Сравнение морских маршрутов Европа – Дальний Восток

С экономической точки зрения использование СМП также выглядит весьма привлекательным. Себестоимость транспортировки одного контейнера в зимний период навигации по СМП при легком типе ледовых условий в среднем на 25 % выше, из-за необходимости ледовой проводки караванов судов, чем по альтернативному южному пути через Суэцкий канал. Однако в летний период стоимость перевозки по рассматриваемому маршруту будет ниже приблизительно на 35 %. Учитывая ставшую все более реальной перспективу круглогодичного судоходства, связанную

с климатическими сдвигами и стремительным сокращением арктического ледового покрова [2], [3], привлекательность СМП возрастет. Помимо России такой маршрут привлекателен для США, Канады, Дании, Норвегии, ЕС в целом, Китая и Японии.

Кроме того, использование СМП минимизирует риски, а соответственно, и экономические издержки, связанные с возникновением угрозы пиратских нападений на суда, которые стали достаточно частым явлением на южных маршрутах. Сегодня владельцы судов, использующие для передвижения южные маршруты, к которым относятся, в том числе, Суэцкий и Панамский каналы, воды Аденского залива и др., сталкиваются с вынужденной необходимостью нанимать вооруженную охрану для сопровождения своих судов, что, несомненно, увеличивает себестоимость таких грузоперевозок. Согласно статистике [4], только с января по сентябрь 2015 г. было зафиксировано 306 случаев пиратского нападения на суда, большая часть из которых приходится на южные маршруты (рис. 2).

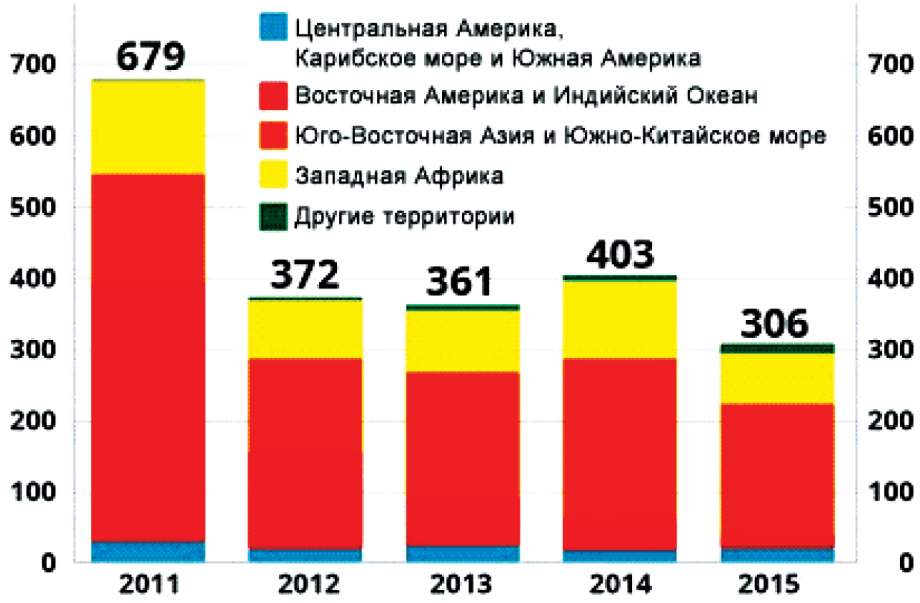


Рис. 2. Статистика пиратских нападений за период 2011 – 2015 гг.
(данные Bergen Risk Solution на сентябрь 2015 г.)

В июне 2015 г. Председатель Правительства РФ Д. А. Медведев утвердил «Комплексный проект развития СМП», разработанный Минтрансом России совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти [5]. В проекте предусмотрены меры по навигационно-гидрографическому, гидрометеорологическому, аварийно-спасательному обеспечению судоходства в акватории СМП, а также развитию морских портов и обеспечению вопросов обороны в акватории СМП. Согласно справке «Комплексного проекта развития СМП», его реализация, намеченная на период 2015 – 2030 гг., позволит обеспечить безопасность мореплавания в акватории СМП и защиту морской среды от загрязнения, а также повысит надежность транзитных перевозок и перевозок углеводородного сырья с мест добычи, расположенных на арктическом побережье и континентальном шельфе Российской Федерации.

Использование средств функциональных дополнений ГНСС для навигационного обеспечения водного транспорта в акватории Северного морского пути

Применение средств функциональных дополнений ГНСС (рис. 3) призвано повысить качество координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей и расширить спектр и возможности потребителей по решению различного рода задач навигационного обеспечения.

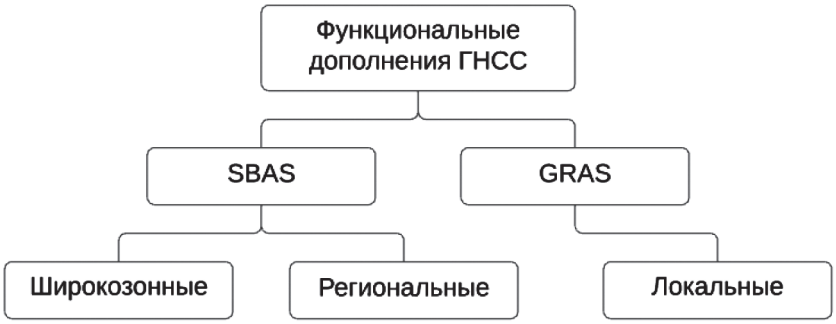


Рис. 3. Функциональные дополнения ГНСС ГЛОНАСС/GPS, используемые для обеспечения безопасности судоходства водного транспорта

Как известно, функциональные дополнения ГНСС ГЛОНАСС/GPS в зависимости от зоны покрытия весьма условно можно разделить на локальные, региональные и широкозонные [6]. Наибольшее распространение на водном транспорте получили локальные дифференциальные подсистемы (ЛДПС), исторически разворачиваемые на базе существующих радиомаяков. Эти системы позволяют добиться увеличения точности определения координат морских и речных судов до единиц метров, что особенно важно при обеспечении безопасности мореплавания в проливах, прибрежных зонах, узкостях, акваториях портов, гаваней и т. д.

Основу любой ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS составляет наземная контрольно-корректирующая станция (ККС), координаты расположения которой известны с высокой степенью точности (рис. 4). В литературе также встречаются названия «опорная», или «базовая», для аналогичных ККС станций. Путем сравнения измеренных значений псевдодальностей до всех видимых навигационных космических аппаратов (НКА) с достоверными значениями, рассчитанными на основе информации об их орбитах и точном знании своего местоположения, ККС вырабатывает поправки к псевдодальностям, которые передаются потребителям для их учета в аппаратуре при решении навигационной задачи в виде разности между измеренными и вычисленными значениями. Такого рода поправки называются *дифференциальными* и передаются от ККС- в УКВ-диапазоне частот от 283,5 до 325,0 кГц [7] для всех видимых НКА.

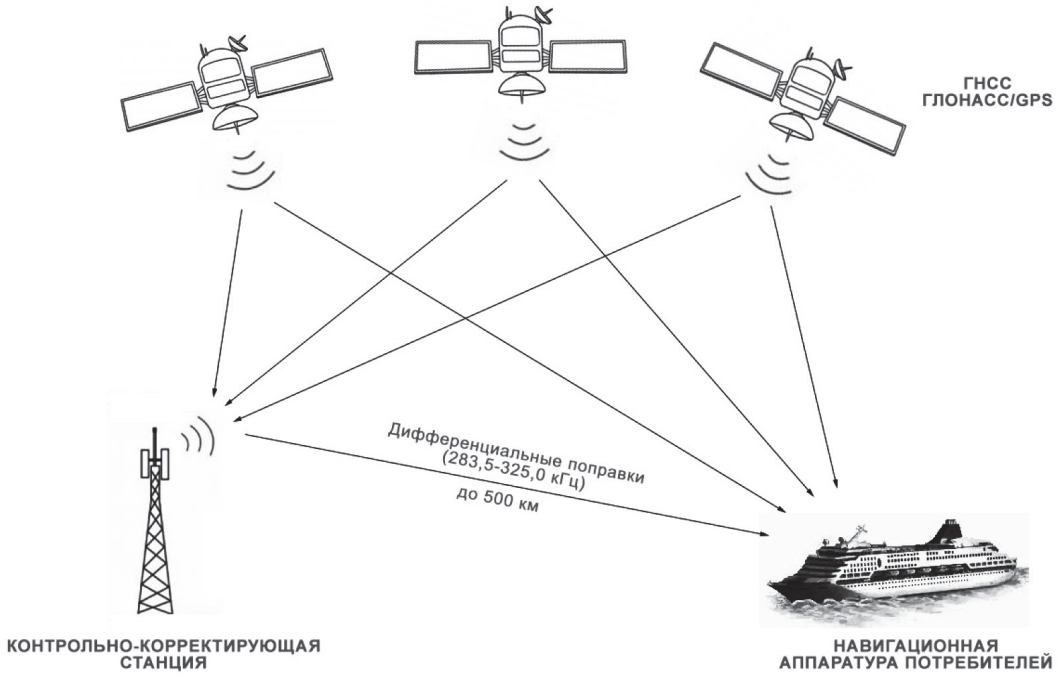


Рис. 4. Принцип действия локальной дифференциальной подсистемы ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Аппаратура потребителей, принимающая и учитывающая дифференциальные поправки (ДП), позволяет обеспечить повышение точности координатных определений по ГНСС ГЛОНАСС/GPS от 1 до 5 м в радиусе до 500 км от ККС [8]. На больших расстояниях применение дифференциальных поправок является методически нецелесообразным ввиду нарастания некомпенсируемых погрешностей за условия распространения сигналов от видимых НКА. Основными из составляющих в общей доле некомпенсируемых погрешностей являются задержки, вызванные условиями распространения в ионосфере и тропосфере. Однако методы повышения дальности применяемости дифференциальных поправок ЛДПС существуют и совершенствуются. Дальнейшее развитие дифференциальных методов коррекции навигационных измерений с применением аппаратуры потребителей способствовало появлению более абстрактного термина «корректирующая информация», который расширяет понятие «дифференциальные поправки» применительно к другим средствам функциональных дополнений ГНСС.

Региональные дифференциальные подсистемы (РДПС) образуются путем объединения данных от нескольких локальных подсистем, территориально расположенных в каком-либо регионе [9]. Например, РДПС Дальнего Востока включает шесть локальных подсистем. Для единства управления и навигационного обеспечения региональные подсистемы включают в свой состав единый центр управления, что обеспечивает также более широкие возможности для конечного потребителя.

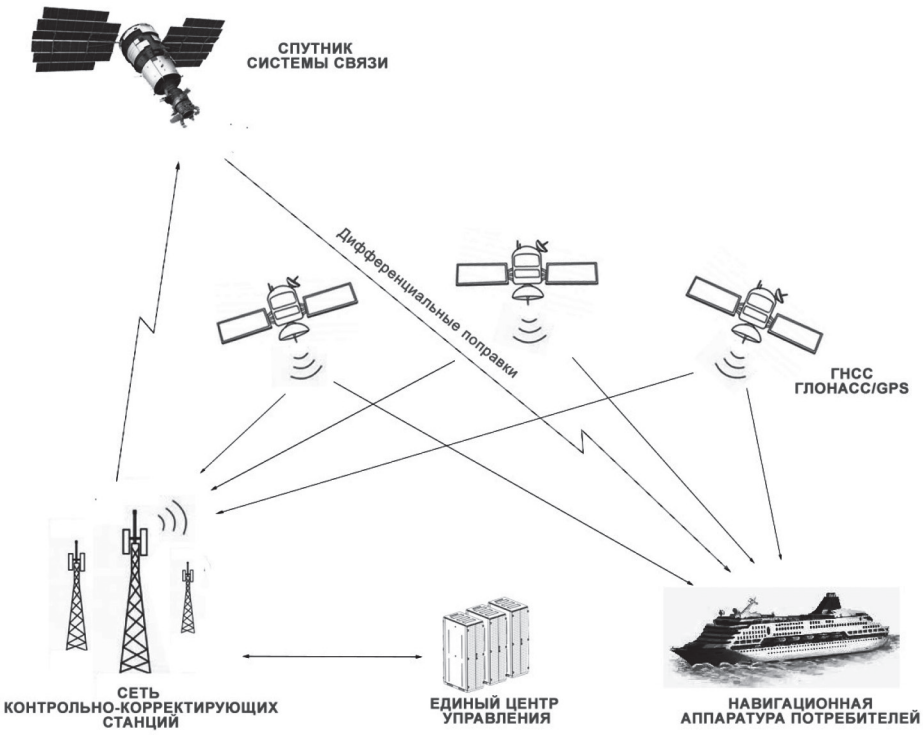


Рис. 5. Принцип действия широкозонной дифференциальной подсистемы ГНСС ГЛОНАСС/GPS

В широкозонных дифференциальных подсистемах (ШДПС) ГНСС ГЛОНАСС/GPS корректирующая информация и данные доступности ГНСС ГЛОНАСС/GPS, определяемые наземными станциями контроля, транслируются потребителям с помощью геостационарных спутников (рис. 5). Кроме того, корректирующая информация, передаваемая в ШДПС, как правило, отличается от дифференциальных поправок ЛДПС. В настоящее время в мире действуют следующие ШДПС: американская WAAS (Wide Area Augmentation System), европейская EGNOS (European Geostationary Navigation Service), японская MSAS (Multi-functional Satellite-based Augmentation System), индийская GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation), Российская СДКМ (система дифференциальной коррекции и мониторинга) — рис. 6.

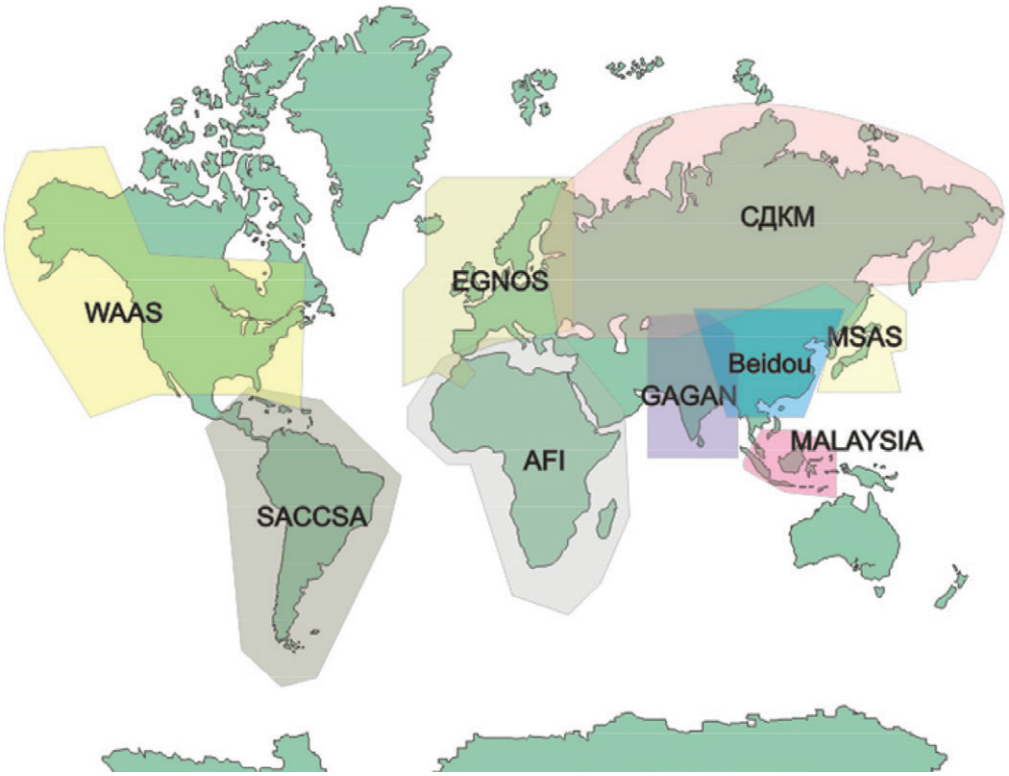


Рис. 6. Зоны покрытия ШДПС

В состав любой ШДПС входят:

– сеть наземных станций слежения, которые осуществляют непрерывный сбор данных от всех НКА на двухчастотные геодезические приемники и передачу полученных измерений на центральную станцию управления в режиме реального времени;

– центральная станция управления, необходимая для обработки и анализа данных, полученных со всех станций слежения и формирования коррекций;

– станции закладки корректирующей информации на геостационарные спутники;

– геостационарные спутники для передачи корректирующей информации на большую территорию всем пользователям сети.

На сегодняшний день в России на завершающей стадии находится создание отечественной ШДПС, которая получила название *СДКМ* (система дифференциальной коррекции и мониторинга), охватывающая в планах всю территорию России.

Надежное навигационное обеспечение СМП корректирующими данными, позволяющее осуществлять высокоточное местоопределение судов по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS, вызывает интерес как ШДПС, так и ЛДПС. Однако в данном случае необходимо определить преимущества и недостатки, присущие указанным классам функциональных дополнений. В качестве существенного недостатка ШДПС следует отметить использование спутников связи для дистрибьюции корректирующей информации. Так, например, для обеспечения устойчивой связи в высоких широтах использование геостационарных КА недопустимо, так как при широтах выше 75° геостационарные спутники имеют неуверенную зону покрытия (доступность). Низкоорбитальные системы связи лишены данного недостатка, однако орбитальная группировка такой системы должна быть полностью развернута, в противном случае будут наблюдаться динамические разрывы дифференциального поля. При этом также необходимо отметить, что время доведения до пользователей системы информации о целостности ГНСС у ЛДПС значительно меньше, чем у ШДПС, что, несомненно, оказывает влияние на обеспечение безопасности судоходства, особенно в таком сложном с навигационной точки зрения районе, как СМП.

В то же время существенным недостатком использования ЛДПС для решения поставленной задачи представляется ограниченная дальность действия системы, что в сочетании с наличием недостаточной инфраструктуры СМП может вызывать проблемы, обусловленные построением рациональной топологии дифференциального поля [10], [11]. Указанный недостаток может компенсироваться установкой дополнительных ККС или применением новых методов формирования корректирующей информации, так как дальность распространения радиоволн над морской поверхностью в Арктической зоне даже сейчас превышает 500 км. Кроме того, эффективность работы ЛДПС может быть повышена с применением сетевых решений и объединением всех ККС, формирующих дифференциальное поле на СМП, в единую цепь, на основе которой можно сформировать комплексную систему контроля и управления дифференциальным полем. В таком случае использование цепи ЛДПС для обеспечения высокоточного позиционирования представляется весьма конструктивным решением.

Выводы

1. В данной статье сделан вывод о значительном потенциале СМП как судоходной магистрали как для российского, так и для международного судоходства. Для международных потребителей его использование является способом сократить издержки при транспортировке грузов между европейскими и азиатскими портами, для России СМП представляет собой естественную магистраль для транспортировки ресурсов, добываемых в Арктическом регионе. Отмечается, что в этих условиях возрастает актуальность навигационного обеспечения водного транспорта, использующего данную магистраль, которая характеризуется значительной протяженностью и специфическими климатическими условиями.

2. Приведена топология функциональных дополнений ГНСС в зависимости от зоны покрытия. На основании анализа сравнительных преимуществ различных классов функциональных дополнений сделан вывод о том, что в условиях СМП наиболее перспективным является использование локальных и широкозонных дифференциальных подсистем. При этом ШДПС характеризуется рядом ограничений (использование спутниковой связи для передачи корректирующей информации, время передачи), а функциональные ограничения ЛДПС могут быть компенсированы увеличением количества ККС либо их координацией в рамках единой сети. Таким образом, на данном этапе развития навигационных технологий именно использование локальных дифференциальных подсистем является оптимальным решением для обеспечения безопасной навигации в акватории СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куватов В. И.* Потенциал Северного морского пути арктической зоны России. Факторы и стратегия развития / В. И. Куватов, Д. В. Козьмовский, Н. В. Шаталова // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 6 (25). — С. 20.

2. *Антрим К.* Новая судоходная Арктика / К. Антрим // Россия в глобальной политике. — 2010. — Т. 8. — № 5. — С. 35–48.

3. Глобальное таяние арктических льдов [Электронный ресурс]: сайт агентства по инновациям и развитию экономических и социальных проектов. — Режим доступа: http://www.innoros.ru/news/foreign/16/03/globalnoe-tayanie-arkticheskikh-ldov (дата обращения – 30.03.2016).

4. Bergen Risk Solution [Электронный ресурс]: оф. сайт компании. — Режим доступа: http://www.bergenrisksolutions.com/ (дата обращения – 16.06.2016).

5. Справка о Комплексном проекте развития Северного морского пути [Электронный ресурс]: оф. сайт правительства России. — Режим доступа: http://government.ru/orders/18405/ (дата обращения: 16.06.2016).

6. *Каретников В. В.* Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — 2-е изд. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 525 с.

7. ГОСТ Р 56055-2014. Глобальная навигационная спутниковая система. Морская дифференциальная подсистема. Проектирование контрольно-корректирующих станций. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2015. — 15 с.

8. *Каретников В. В.* Технологии глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS на службе работников речного транспорта / В. В. Каретников, Г. Б. Чистяков, В. А. Бекряшев, Р. В. Волков // Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 3 (53). — С. 28–29.

9. *Андрюшечкин Ю. Н.* Роль корректирующей информации в процессе обеспечения безопасности судоходства / Ю. Н. Андрюшечкин, В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2012. — № 1. — С. 75–78.

10. *Каретников В. В.* Моделирование топологической структуры зон действия контрольно-корректирующих станций дифференциальной системы ГЛОНАСС/GPS, установленных на реке Обь / В. В. Каретников, Ю. Н. Андрюшечкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 86–89.

11. *Сикарев А. А.* Основные аспекты конструктивного подхода к компенсации зон разрыва дифференцальных полей СВ-диапазона на внутренних водных путях России / А. А. Сикарев, В. В. Каретников, Ю. Н. Андрюшечкин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1. — С. 112–115.

CHOOSING A METHOD OF DIFFERENTIAL CORRECTION FOR PROVIDING THE NORTHERN SEA ROUTE WITH GNSS GLONASS/GPS CORRECTION INFORMATION

This article discusses the use of GNSS augmentation under the conditions of the Northern Sea Route (NSR). It describes the basic principles of the GLONASS/GPS differential subsystems, among which local, regional and wide-band subsystems are commonly identified. The importance of improving the quality, security and maritime safety in the waters of NSRs is indisputable in the wake of the expected intensification of traffic ; and the increasing role of NSRs for the transportation of minerals and hydrocarbons from the Arctic regions,. The authors highlight the comparative advantages and disadvantages of using local and wide-area subsystems in the Arctic. They analyze possible limitations to the use of data subsystems in high latitudes, suggesting ways to overcome them. It is concluded that the use of locale-differential subsystems is the most constructive solution in the setting of NSR.

Keywords: GNSS augmentation, NSR, control and correction station, differential corrections.

REFERENCES

1. Kuvatov, V. I., D. V. Kozmovsky, and N. V. Shatalova. “The potential of the Northern Sea Route in the Arctic zone of Russia. Factors and strategy development.” *On-line journal “Naukovedenie”* 6(25) (2014): 20.

2. Antrim, K. “Novaya sudohodnaya Arktika.” *Russia in Global Affairs* 8.5 (2010): 35–48.

3. Globalnoe tajanie arkticheskih ldov. Web. 30 March 2016 <http://www.innoros.ru/news/foreign/16/03/globalnoe-tayanie-arkticheskikh-ldov>.

4. Bergen Risk Solution. Web. 16 June 2016 <http://www.bergenrisksolutions.com/>.

5. Spravka o Kompleksnom proekte razvitiya Severnogo morskogo puti. Web. 16 June 2016 <http://government.ru/orders/18405/>.

6. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. *Topologiya differentsialnyih poley i dalnost deystviya kontrolno-korrektiruyuschih stantsiy vyisokotochnogo mestoopredeleniya na vnutrennih vodnyih putyah*. 2d ed. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.

7. Russian Federation. GOST R 56055-2014. Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Morskaya differentsialnaya podsistema. Proektirovanie kontrolno-korrektiruyuschih stantsiy. Obschie trebovaniya. M.: Standartinform, 2015.

8. Karetnikov, V. V., G. B. Chistyakov, V. A. Bekryashev, and R. V. Volkov. “Technologies of the «GLONASS» global navigation satellite system in service to the river transport workmen.” *Marine Radio-electronics* 3(53) (2015): 28–29.

9. Andryushechkin, Yu. N., V. V. Karetnikov, and A. A. Sikarev. “Rol korrektiruyuschey informatsii v protsesse obespecheniya bezopasnosti sudohodstva.” *Information Security Problems. Computer Systems* 1 (2012): 75–78.

10. Karetnikov, V. V., and Yu. N. Andryushechkin. "Modeling of the topological structure of the zones of action of the control-correcting stations differential system GLONASS/GPS installed on the river Ob." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 86–89.

11. Sikarev, A. A., V. V. Karetnikov, and Yu. N Andryushechkin. "The basic aspects of the constructive approach to indemnification of zones of rupture of differential fields of MW on inland waterways of Russia." *Zhurnal Universiteta vodnyih kommunikatsiy* 1 (2012): 112–115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович — доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf_tss@gumrf.ru
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Миляков Денис Федорович — кандидат технических наук.
КБ «НАВИС»
denism@navis.spb.su
Милякова Яна Денисовна — аспирант.
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
Yana.Milyakova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karetnikov Vladimir Vladimirovich — Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
kaf_tss@gumrf.ru
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Milyakov Denis Fedorovich — PhD.
CD «NAVIS»
denism@navis.spb.su
Milyakova Yana Denisovna — postgraduate.
Supervisor:
Karetnikov Vladimir Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Yana.Milyakova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-192-202
УДК 621.396

А. В. Саушев,
Е. В. Бова

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПОРТОВ И СУДОРЕМОНТНЫХ ЗАВОДОВ

Рассматривается задача параметрического синтеза систем управления электроприводов применительно к технологическим машинам береговых установок. Приводится обзор известных способов решения этой задачи. Анализируются показатели качества систем управления и способы построения критерия оптимальности. Исследуется типовая структурная схема электропривода технологических машин береговых установок, и решается задача параметрического синтеза по критерию запаса работоспособности. Рассматривается пример параметрического синтеза систем управления электропривода с регуляторами состояния, которые находят все более широкое применения на практике. Оптимальный по выбранному критерию результат сравнивается с решением, полученным при использовании обобщенного мультипликативного критерия оптимальности. Делается вывод о целесообразности применения в качестве критерия оптимальности при решении задачи параметрического синтеза систем управления электроприводов запаса работоспособности. Решение, полученное по данному критерию, гарантирует выполнение всех требований, предъявляемых к электроприводу, и обеспечивает его высокую параметрическую надежность.

Ключевые слова: электропривод, система управления, работоспособность, параметрический синтез, запас работоспособности.

Введение

В настоящее время в морских и речных портах, а также на судоремонтных заводах находят применение разнообразные по выполняемым функциям и конструктивному исполнению технологические машины. К их числу относятся различные виды кранов, конвейеры, перегружатели, вагоноопрокидыватели, роботы и манипуляторы, металлорежущие станки и т.п. Электроприводы механизмов этих машин в большинстве случаев являются многомассовыми [1]. К ним предъявляются разнообразные, достаточно жесткие, функциональные требования. Например, к электроприводам *металлорежущих станков* предъявляются повышенные требования по быстродействию и точности, а также диапазону регулирования скорости. В настоящее время наблюдается тенденция к возрастанию этих требований. Так, в соответствии с [2], электроприводы подач металлорежущих станков и промышленных роботов должны обеспечивать режимы позиционирования, заданной скорости и ускорения. При этом полоса пропускания контура скорости должна быть не менее 30 Гц для тиристорных и 100 Гц для транзисторных систем, а диапазоны регулирования от 1000 до 10000. Наличие упругих свойств механизмов металлорежущих станков приводит к возникновению резонансных колебаний с частотами 5 – 200 Гц, что ограничивает быстродействие систем, построенных по принципу подчиненного регулирования [3]. В целях управления применяются также системы на основе регуляторов состояния, синтезируемые методами модального или оптимального управления, включая адаптивную самонастройку.

Особенностью электромеханических систем (ЭМС) объектов водного транспорта и, в частности, береговых ЭМС являются сложные условия их эксплуатации. Эти системы подвержены влиянию параметрических возмущений, что связано с изменением конфигурации механизмов, характеристик материала, массы обрабатываемых деталей, температуры и влажности окружающей среды. В результате возникают флуктуации параметров объекта управления с широким диапазоном изменения моментов инерции от 1,5 до 10 кг·м^2, коэффициентов передачи — от 2,5 до 5, постоянных времени — от 1,5 до 5 с. Влияние возмущений связано с флуктуациями параметров обрабатываемого материала, изменением моментов нагрузки, колебаниями напряжения питающей сети, а также шумами измерительных преобразователей тока, скорости и перемещения. Эти возмущения, в отличие от параметрических, как правило, представляют собой случайные процессы с широким спектром частот, что затрудняет их компенсацию в контуре обратной связи [3].

Параметрический синтез систем управления электроприводов, как правило, сводится к задаче настройки их регуляторов. При этом достаточно часто применяются стандартные настройки на технический и симметричный оптимум [3]. Такие настройки имеют известные недостатки. При их использовании рассматриваются лишь два динамических показателя (время переходного процесса и максимальное перерегулирование), а оптимальный синтез коэффициентов усиления и постоянных времени регуляторов осуществляется лишь по одному критерию — критерию главного показателя [4]. Применение методов модального или оптимального управления позволяет синтезировать системы управления на базе регуляторов состояния для объектов высокого порядка, в том числе с перекрестными связями координат состояния. Однако эти методы могут приводить к решениям с высокой параметрической чувствительностью, малоэффективным в условиях параметрической нестабильности объекта управления.

Следует отметить, что все более широкое применение на практике находят регуляторы с наблюдателями состояния (РНС). Их достоинством является достаточно гибкая структура регулятора и необходимость наличия лишь одного датчика выходной координаты объекта управления. Для параметрической оптимизации таких систем достаточно часто используется метод модального синтеза на основе стандартных распределений корней характеристического полинома. Однако при этом не учитываются показатели параметрической надежности и возможные ограничения координат, присущие электроприводу. В этой связи в управлении ЭМС стало развиваться направление робастного управления, т. е. сохранения работоспособности, а также основных показателей качества систем автоматического управления при вариации параметров элементов регуляторов в заданных пределах [5]. Вместе с тем такой подход не позволяет в полной мере учесть пара-

метрическую нестабильность большинства ЭМС, поэтому для электроприводов технологических машин объектов водного транспорта, работающих в сложных условиях и подверженных влиянию внешних возмущающих воздействий, требуется формирование критерия оптимальности, обеспечивающего наряду с показателями назначения заданную или максимально возможную вероятность безотказной работы. Таким образом, ставится задача формирования критерия оптимальности, обеспечивающего требуемую вероятность безотказной работы и выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения систем управления электроприводов и разработки алгоритмов синтеза этих систем по выбранному критерию.

Формирование критерия оптимальности при синтезе систем управления. В работах [5], [6] отмечается, что применение методов параметрической оптимизации позволяет учесть весь комплекс требований, предъявляемых к системам автоматического управления электропривода. Трудность решения задачи оптимизации осложняется проблемой формирования критериев качества управления, большинство которых носят косвенный характер, и сходимостью алгоритмов поиска глобального экстремума выбранной целевой функции. Отмечается, что синтез систем с РНС следует осуществлять не на основе косвенных критериев оптимальности, а на основе требований к качеству управления электропривода, включая показатели назначения (быстродействия, точности, энергетической эффективности) и параметрической надежности. Находит также применение обобщенный критерий качества, включающий следующие нормированные показатели: быстродействия $\overline{Y}_1$, точности $\overline{Y}_2$, параметрической грубости $\overline{Y}_3$ и энергетических затрат на управление $\overline{Y}_4$:

$$\overline{Y}_m = 1 - (\prod_{i=1}^{m} \overline{Y}_i)^{1/m}, \qquad (1)$$

где $m = 4$ — число показателей качества в составе критерия.

В качестве показателя быстродействия принимается время нарастания переходной характеристики $t_н$, в качестве показателя точности $\overline{Y}_2$ — средний модуль относительного отклонения выходной координаты системы на интервале времени от $t_н$ до $t_п$:

$$\overline{\sigma}_y = \frac{1}{N-T} \sum_{j=T}^{N} \left| \frac{Y_j - Y_3}{Y_3} \right| \cdot 100\ \%,$$

где $T = t_н/T_0$ и $N = t_п/T_0$ — соответственно относительное время нарастания переменной и относительное время переходного процесса; T_0 – период квантования.

В качестве показателя робастности $\overline{Y}_3$ в работе [5] предлагается использовать средний модуль отклонения переходной характеристики ЭМС при вариации параметров относительно расчетных значений за время переходного процесса:

$$\overline{\sigma}_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left| \frac{Y_j - Y_j^*}{Y_j} \right| \cdot 100\ \%,$$

где Y_j, Y_j^* — значения выходной координаты, соответственно, при расчетных и измененных параметрах системы управления.

Показателем энергетических затрат на управление $\overline{Y}_4$ может являться пиковое значение тока электродвигателя, которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части системы.

Основным недостатком критерия (1) является его мультипликативная форма задания, которая является субъективной и имеет известные ограничения [4]. В качестве критерия оптимальности для решения задачи параметрического синтеза систем управления электроприводов технологических машин портов и судоремонтных заводов предлагается использовать запас работоспособности. Сущность, достоинства и особенности практического использования этого критерия подробно изложены в работах [7], [8]. При этом в работе [7] доказано, что при ограниченных статистических данных о законах распределения параметров элементов ЭМС или при их полном отсутствии запас работоспособности в полной мере характеризует вероятность безотказной работы и может быть использован в качестве критерия оптимальности при решении задач структурного и параметрического синтеза.

Рассмотрим типовую структурную схему электропривода технологических машин береговых установок. Механическая часть, как правило, приводится к двухмассовой расчетной схеме. На рис. 1 представлена структурная схема системы подчиненного управления двухмассовым электроприводом, содержащая внутренний контур управления электромагнитным моментом и скоростью.

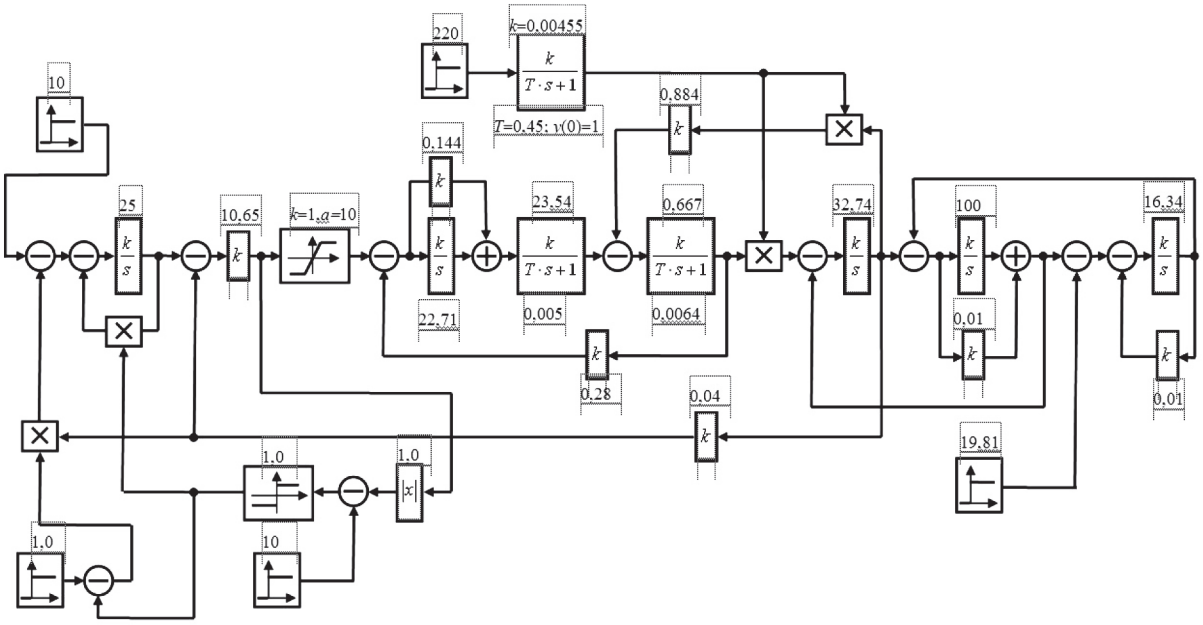


Рис. 1. Структурная схема системы управления электропривода с подчиненным регулированием координат и адаптивным регулятором скорости

Управление электромагнитным моментом осуществляется при постоянном токе намагничивания. Объектом управления контура момента является преобразователь и электрическая часть электродвигателя, представленные апериодическим звеном первого порядка. Регулятор момента интегрально-пропорциональный, управление скоростью двухконтурное. Первый контур скорости содержит пропорциональный регулятор, настроенный на технический оптимум, второй — адаптивный регулятор, меняющий свою структуру в зависимости от режима работы привода. Регулятор скорости идентифицирует два режима работы электропривода: режим стабилизации электромагнитного момента и режим стабилизации скорости. В режиме стабилизации электромагнитного момента регулятор скорости — апериодическое звено первого порядка, в режиме стабилизации скорости регулятор скорости — интегральное звено. Двухконтурный регулятор скорости позволяет обеспечивать астатические характеристики электропривода и перерегулирование скорости первой массы на уроне 4,3 %.

Для решения задач параметрического синтеза методами планирования эксперимента [9] были построены факторные модели, устанавливающие связь между показателями качества системы управления и рассматриваемыми первичными параметрами: коэффициентами усиления регуляторов тока ($k_{РТ}$) и скорости ($k_{РС}$), постоянной времени регулятора тока ($T_{РТ}$) и коэффициентом жесткости упругой связи (c_{12}). Ограничения для значений этих параметров приведены в табл. 1.

В качестве показателей качества были выбраны:

Y_1 — время нарастания скорости электродвигателя до установившегося значения;

Y_2 — относительная величина перерегулирования, характеризующая степень устойчивости системы;

Y_3 — пиковое значение тока якоря электродвигателя, косвенно характеризующее энергетические затраты электропривода [5].

Условия работоспособности имеют следующий вид:

$$0 < Y_1 < 0{,}7 \text{ с}; \; 0 < Y_2 < 4{,}5; \; 0 < Y_3 < 35 \text{ А}.$$

Таблица 1

Диапазоны варьирования первичных параметров системы управления

Фактор	Нормированное обозначение	Значения уровней факторов		
		минимальное	среднее	максимальное
$k_{РС}$, В · рад / с	X_1	6,66	10,66	14,66
$k_{РТ}$, В · А	X_2	0,074	0,144	0,214
c_{12}, Н · м / рад	X_3	100	300	500
$1/T_{РТ}$, 1/с	X_4	12,713	22,713	32,713

Для проведения эксперимента был выбран дробный факторный эксперимент — ДФЭ 2^{4-1}, уравнение регрессии которого имеет вид [7]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_1X_2 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_3. \quad (2)$$

Существенными были выбраны факторы X_1, X_1, X_3. Фактор X_4 варьировался на основе генерирующего соотношения $X_4 = X_1X_2X_3$. В ходе эксперимента менялись значения момента сопротивления. Был проведен также полный факторный эксперимент с тремя факторами: X_1, X_2, X_3. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{23}X_2X_3 + b_{13}X_1X_3 + b_{123}X_1X_2X_3\,. \quad (3)$$

Матрица планирования приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования по схеме дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{4-1}

№ п/п.	Факторы				Отклики											
					$Y_1 = t_{нар}$, с			$t_{нар}$	$Y_2 = \delta$, %			$\overline{\delta}$	$Y_3 = I_{max}$, А			I_{max}
	X_1	X_2	X_3	X_4	$M_с = 0$	$M_с = 0{,}5M_н$	$M_с = M_н$		$M_с = 0$	$M_с = 0.5M_н$	$M_с = M_н$		$M_с = 0$	$M_с = 0{,}5\,M_н$	$M_с = M_н$	
1	+1	+1	+1	+1	0,69	0,95	1,53	1,05	2,49	1,74	1,00	1,75	36,09	36,58	37,06	36,58
2	–1	+1	+1	–1	0,74	1,04	1,76	~~1,18~~	5,56	4,16	2,39	4,04	32,61	33,57	34,68	~~33,62~~
3	+1	–1	+1	–1	0,74	1,02	1,67	1,14	2,79	1,99	1,36	2,05	32,31	33,47	34,60	33,46
4	–1	–1	+1	+1	0,69	0,96	1,59	1,08	4,58	3,99	2,30	3,62	39,47	40,05	40,44	39,99
5	+1	+1	–1	–1	0,74	1,02	1,67	1,14	3,90	2,92	1,50	2,77	33,53	34,79	36,35	34,89
6	–1	+1	–1	+1	0,69	0,96	1,55	1,07	5,61	3,82	2,69	4,04	36,95	37,74	38,51	37,73
7	+1	–1	–1	+1	0,70	0,94	1,57	1,07	2,48	1,89	1,52	1,96	37,23	37,85	38,57	37,89
8	–1	–1	–1	–1	0,74	1,03	1,69	1,15	6,90	4,46	2,90	4,75	35,50	36,79	38,04	36,78

При проведении параллельных опытов номинальный момент сопротивления принимался равным $M_н$ = 19,8 Н·м.

Оценки коэффициентов уравнений регрессии определяются по формулам:

$$b_g = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} f_g(X_k)\overline{Y_k}; \quad g = 0{,}1,\ \ldots,\ i,\ \ldots,\ j,\ \ldots,\ N-1,$$

где k — номер опыта, k = 1, 2, ..., N, а переменная g определяет базисную функцию f_g, которая соответствует фактору X_i или произведению факторов (например, $X_i X_j$).

В частности, коэффициенты регрессионных моделей для экспериментальных планов ДФЭ и ПФЭ 2^{4-1} определяются по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_{0k}\overline{Y_k}\ ; \quad b_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_{ik}\overline{Y_k}, i\ =\ 1{,}2,\ \ldots,\ n\ ;$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_{ik}X_{jk}\overline{Y_k}; \quad i,j = 1,2,\ \ldots\ ,n\ i \neq j\ ;$$

$$b_{ijl} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} X_{ik}X_{jk}X_{lk}\overline{Y_k},\ i,j,l = 1,2,\ \ldots\ ,n\ i \neq j \neq l,$$

где b_0 — коэффициент, являющийся свободным членом уравнения регрессии; b_i — коэффициенты линейных членов уравнения; b_{ij} — коэффициенты при парных взаимодействиях факторов; b_{ijl} — коэффициент при тройном взаимодействии факторов.

Расчетные значения коэффициентов модели для обоих экспериментальных планов при $M_c = 0$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты факторных моделей (2) и (3)

Коэффициент модели	Показатели качества схемы ДФЭ 2^{4-1}			Коэффициент модели	Показатели качества схемы ПФЭ		
	Y_1	Y_2	Y_3		Y_1	Y_2	Y_3
	$t_{нар}$, с	δ, %	I_{max}, А		$t_{нар}$, с	δ, %	I_{max},, А
b_0	2,2196	6,243	72,731	b_0	0,7142	4,288	35,462
b_1	–0,0159	–1,982	–1,326	b_1	0,0005	–1,374	–0,671
b_2	0	0,053	–1,322	b_2	–0,0020	0,102	–0,663
b_3	0,0058	–0,519	–0,910	b_3	–0,0020	–0,433	–0,341
b_4	–0,0435	–0,280	1,680	b_{12}	–0,0016	0,177	0,682
b_5	–0,006	0,200	1,382	b_{23}	0,0009	0,069	–0,103
b_6	0,0061	0,005	–0,303	b_{13}	–0,0004	0,160	–0,250
b_7	–0,0127	0,048	–0,459	b_{123}	–0,0243	–0,499	1,980

Эксперимент был проверен на воспроизводимость, а модели (2) и (3) — на адекватность.

Как установлено в работе [7], для параметрического синтеза ЭМС по критерию запаса работоспособности необходимо построить область работоспособности исследуемой системы. При этом, в случае наличия аналитической модели, связывающей между собой в явном виде показатели качества системы и ее оптимизируемые параметры, наиболее эффективным является метод параллельных прямых [10]. Следуя рекомендациям работы [7], методом параллельных прямых [10], [11] были определены граничные точки областей работоспособности для обоих экспериментов и получены модели, аналитически описывающие эти области. Например, для случая трех факторов модель, записанная в виде рекуррентного уравнения на основании [10], имеет вид:

$$\mathbf{M}: \varphi_1 = Y_1 \geq 0; \varphi_2 = 0,7 - Y_1 \geq 0; \varphi_3 = Y_2 \geq 0; \varphi_4 = 4,5 - Y_1 \geq 0; \varphi_5 = Y_3 \geq 0; \varphi_6 = 35 - Y_1 \geq 0\ .$$

$$\mathbf{P}: \varphi_7 = X_1 + 1 \geq 0; \varphi_8 = 1 - X_1 \geq 0; \varphi_9 = X_2 + 1 \geq 0; \varphi_{10} = 1 - X_2 \geq 0; \varphi_{11} = X_3 + 1 \geq 0; \varphi_{12} = 1 - X_3 \geq 0.$$

$$\varphi_{12} = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|; \varphi_{34} = 0,5(\varphi_3 + \varphi_4 - |\varphi_3 - \varphi_4|; \varphi_{56} = 0,5(\varphi_5 + \varphi_6 - |\varphi_5 - \varphi_6|;$$

$$M = M(X) = 0,5(\varphi_{12} + \varphi_{34} - |\varphi_{12} - \varphi_{34}|; \varphi_{56} = 0,5(\varphi_{14} + \varphi_{56} - |\varphi_{14} - \varphi_{56}|;$$

$$\varphi_{78} = 0,5(\varphi_7 + \varphi_8 - |\varphi_7 - \varphi_8|; \varphi_{9,10} = 0,5(\varphi_9 + \varphi_{10} - |\varphi_9 - \varphi_{10}|; \varphi_{11,12} = 0,5(\varphi_{11} + \varphi_{12} - |\varphi_{11} - \varphi_{12}|;$$

$$\varphi_{7,10} = 0,5(\varphi_{78} + \varphi_{9,10} - |\varphi_{78} - \varphi_{9,10}|; P = P(X) = 0,5(\varphi_{7,10} + \varphi_{11,12} - |\varphi_{7,10} - \varphi_{11,12}|;$$

$$G = G(X) = 0,5(P + M) - |P - M|.$$

В приведенных уравнениях область **M** является отображением допусковой области **D** пространства выходных параметров системы управления в пространство ее оптимизируемых внутренних параметров. При этом область **D** имеет вид гиперпараллелепипеда и геометрически задает требуемые ограничения на значения выходных параметров системы. Область **P** задает огра-

ничения на внутренние параметры системы. Функция $G(X)$ является аналитическим описанием области работоспособности **G** системы управления.

Для выбора оптимальных по критерию запаса работоспособности исследуемых параметров использовались рассмотренные в работе [7] алгоритмы, предполагающие выполнение процедуры статистического моделирования. На рис. 2 приведены результаты моделирования в виде представления допусковой области **M** массивом экспериментальных точек в разных ракурсах. Допусковая область **P** имеет вид прямоугольника.

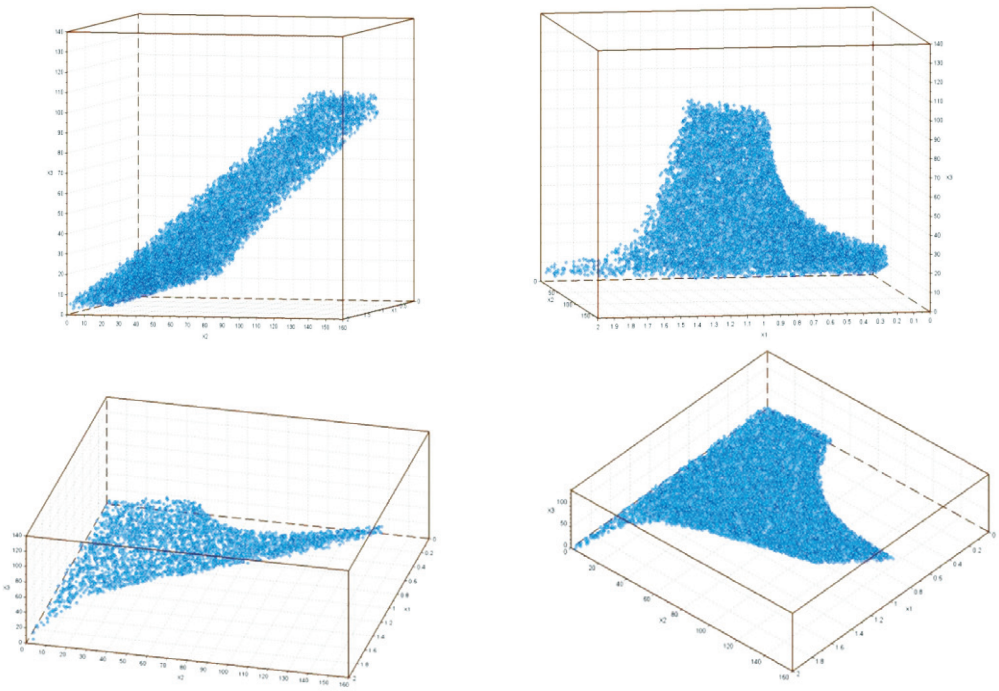


Рис. 2. Представление допусковой области **M** массивом сгенерированных точек в разных ракурсах

На рис. 3*а* в виде массива экспериментальных точек представлена область работоспособности при увеличенных на 10 % ограничениях на значения показателей качества, на рис. 3*б* — область, в которой находится оптимальное решение. Полученные в ходе оптимизации значения параметров $k_{PC} = 11{,}8$; $k_{PT} = 0{,}12$; $c_{12} = 270$ гарантируют выполнение всех ограничений на динамические показатели системы управления и обеспечивают максимально возможный в рамках данной структуры запас работоспособности.

а) б)

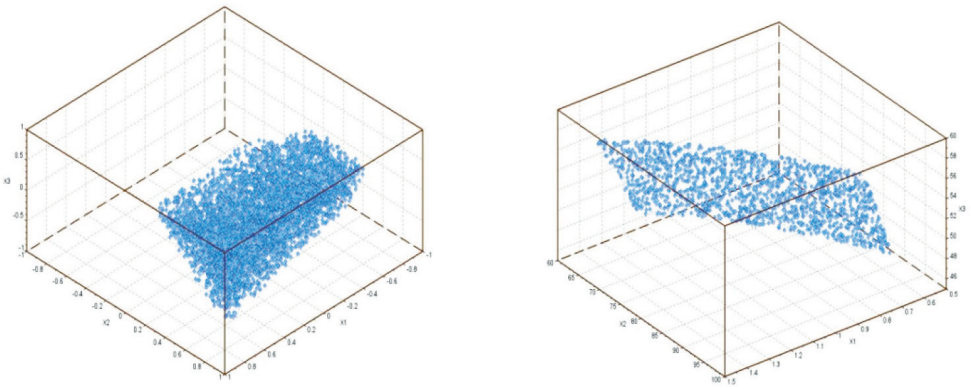


Рис. 3. Представление области работоспособности массивом сгенерированных точек:
а — при расширении допустимых пределов изменения выходных параметров;
б — при заданных пределах изменения выходных параметров

Анализ показал, что механическая часть электропривода оказывает существенное влияние на динамику системы управления. Это лишний раз подтверждает необходимость применения выведенных в работе [12] формул получения параметров эквивалентной расчетной схемы механической подсистемы, которые по сравнению с известными формулами позволяют существенно повысить точность расчета искомых параметров.

Поскольку все более широкое применение для построения систем управления электропривода находят структуры с регуляторами состояния, рассмотрим процесс параметрического синтеза для двухмассовой ЭМС постоянного тока, представленной на рис. 4 [5]. В схеме замкнутый контур тока представлен апериодическим звеном первого порядка с параметрами K_I и T_I. Исходные данные параметров системы [5]:

$$K_I = 1;\ T_I = 0{,}007;\ C = 0{,}16;\ J_1 = 0{,}015;\ J_2 = 0{,}05;\ c_{12} = 0{,}65;\ K_д = 0{,}01.$$

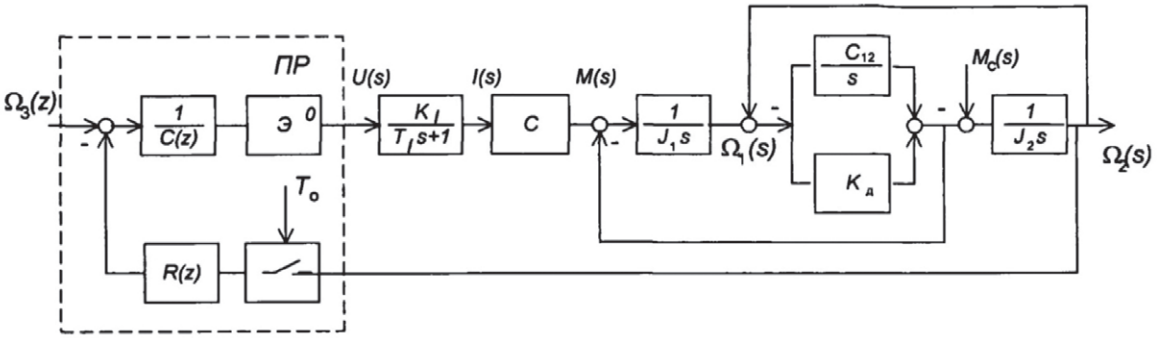


Рис. 4. Структурная схема системы управления электропривода постоянного тока с регулятором состояния

В качестве выходной координаты электропривода при расчете динамических показателей принималась скорость второй массы. Показателями качества являлись рассмотренные выше показатели быстродействия $Y_1 = t_н$, точности $Y_2 = \sigma_y$, робастности $Y_3 = \sigma_R$, энергетических затрат $Y_4 = I_я$. Оптимизируемыми параметрами являются параметры параметрического регулятора, передаточная функция которого в числителе имеет вид полинома $R(S) = b_0 + b_1S + b_2S^2$, а в знаменателе равна единице. Полученные в работе [5] оптимальные по комплексному критерию (1) параметры параметрического регулятора имеют следующие значения: $b_0 = 7{,}1$; $b_1 = 1{,}35$; $b_3 = 0{,}21$. Графики переходных процессов приведены на рис. 5, где график *1* соответствует расчетным по критерию (1) параметрам системы управления, а графики *2* и *3* — вариациям параметров J_2 и c_{12} механической части электропривода.

а) б)

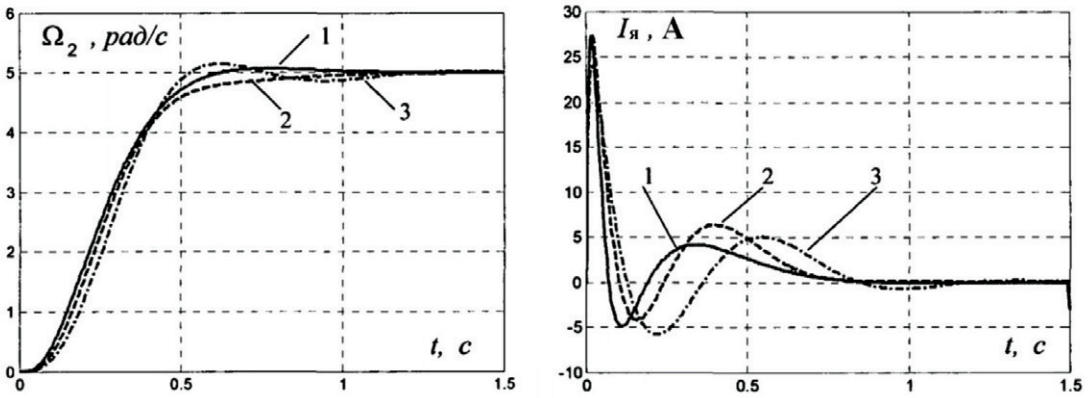


Рис. 5. Графики переходных процессов при оптимизации параметров параметрического регулятора состояния по комплексному критерию:
а — график угловой скорости второй массы электропривода;
б — график изменения тока якоря электропривода

Как отмечалось ранее, применение критериев вида (1), относящихся к мультипликативному способу задания обобщенного критерия качества, может привести к существенным ошибкам. Учитывая необходимость обеспечения максимально возможного запаса работоспособности, было осуществлено моделирование данной системы управления на языке комплекса Matlab 7.1 и составлена модель ЭМС в программной среде Simulink. Эксперимент проводился по схеме ПФЭ, матрица которого имеет вид аналогичный табл. 3. Исследуемые параметры варьировались в следующем диапазоне: $b_0 \in [2; 10]$, $b_1 \in [0{,}6; 1{,}6]$, $b_2 \in [0{,}1; 0{,}26]$. Графики переходных процессов для тока якоря и угловой скорости второй массы, соответствующие всем строкам матрицы планирования, представлены на рис. 6.

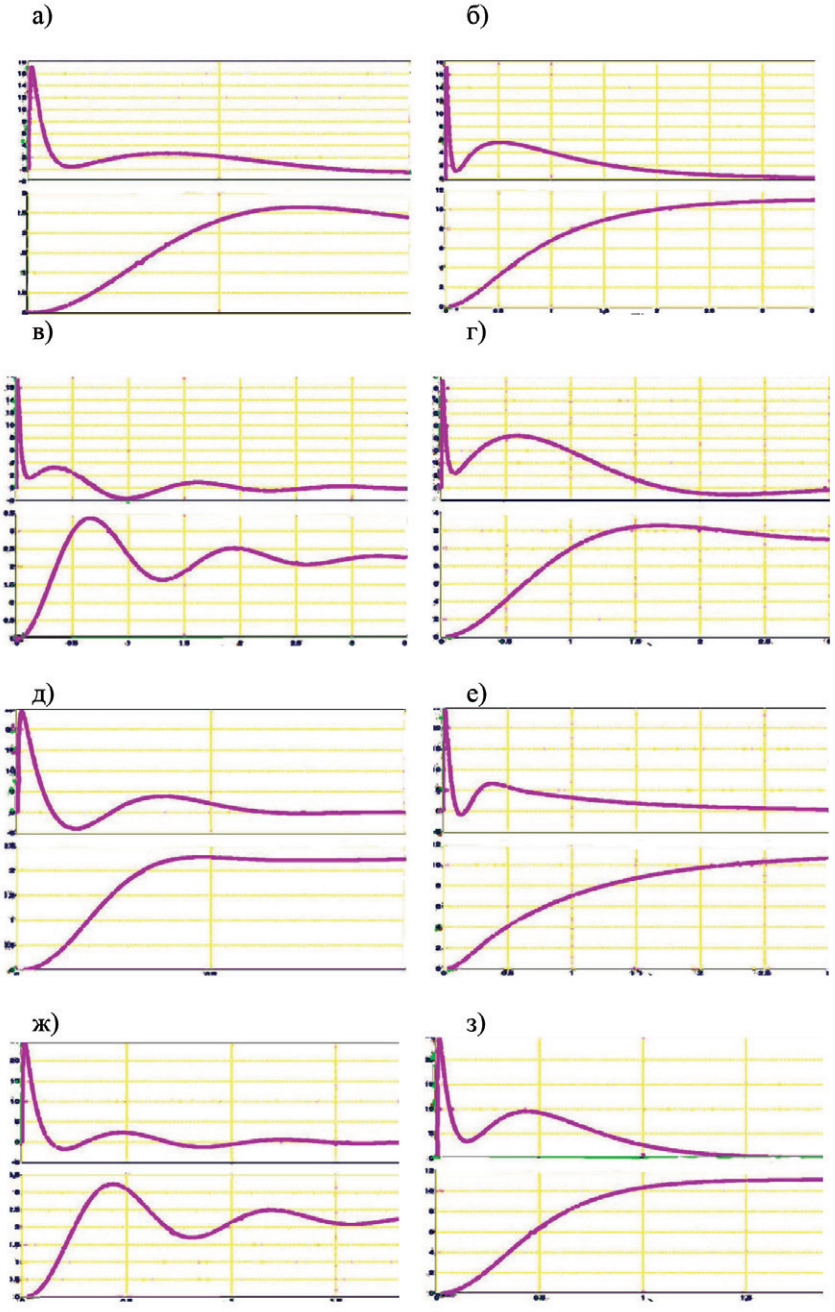


Рис. 6. Переходные процессы тока якоря (верхние графики) и угловой скорости (нижние графики) второй массы при моделировании ЭМС по схеме ПФЭ (на основе анализа табл. 2): *а* — первая строка таблицы; *б* — вторая строка; *в* — третья строка; *г* — четвертая строка; *д* — пятая строка; *е* — шестая строка; *ж* — седьмая строка; *з* — восьмая строка

Аналогичные исследования проводились при одновременной вариации четырех параметров, включая жесткость упругой связи. Результаты оптимизации по критерию запаса работоспособности оказались близкими к значениям параметров, полученным в работе [5], но с чуть большим (на 7 %) значением времени переходного процесса и с большим на 15 % запасом работоспособности ЭМС. При этом обеспечивается выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения электропривода и его максимально возможный запас работоспособности.

Выводы

1. Для параметрического синтеза систем управления электроприводов объектов водного транспорта, включая электроприводы технологических машин портов и судоремонтных заводов, в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать запас работоспособности системы. Этот показатель гарантирует выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения электропривода, сводит задачу векторной оптимизации к задаче скалярной оптимизации и обеспечивает высокую вероятность безотказной работы.

2. Для обеспечения максимально возможного запаса работоспособности систем управления электроприводов следует использовать специально разработанные методы и алгоритмы, изложенные в работах [10], [11]. При этом гарантируется получение глобального оптимума и отсутствие зацикливания в процессе поиска. Кроме того, снимаются ограничения на размерность пространства оптимизируемых параметров электропривода.

3. Рассмотренные примеры иллюстрируют последовательность решения задачи параметрического синтеза по критерию запаса работоспособности для систем управления электроприводов, которые в настоящее время находят самое широкое применение. Примеры подтверждают удобство практического использования запаса работоспособности в качестве критерия оптимизации и вывод о том, что полученное решение является глобальным оптимумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрианов Е. Н.* Моделирование механических систем морской перегрузочной техники методом электрической аналогии / Е. Н. Андрианов, А. В. Саушев, Д. И. Троян // Морской вестник. — 2015. — № 1 (53). — С. 49–52.

2. ГОСТ 27803-91. Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 21 с.

3. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

4. *Батищев А. П.* Поисковые методы оптимального проектирования / А. П. Батищев. — М.: Сов. радио, 1975. — 215 с.

5. *Анисимов А. А.* Формирования критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 36–41.

6. *Тарарыкин С. В.* Робастное модальное управление динамическими системами / С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 5. — С. 41–55.

7. *Саушев А. В.* Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

8. *Абрамов О. В.* Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2014. — № 4 (42). — С. 64–77.

9. *Саушев А. В.* Планирование эксперимента в электротехнике: учеб. пособие / А. В. Саушев. — СПб.: СПГУВК, 2012. — 273 с.

10. *Саушев А. В.* Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.

11. *Саушев А. В.* Методы и алгоритмы параметрического синтеза технических систем на основе областей работоспособности / А. В. Саушев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 5-3 (47). — С. 167–168. DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.090.

12. Саушев А. В. Математическое описание многомассовых механических систем электропривода / А. В. Саушев // Электричество. — 2013. — № 3. — С. 27–33.

PARAMETRICAL SYNTHESIS OF MANAGEMENT SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVES TECHNOLOGICAL MACHINES OF PORTS AND REPAIR YARDS

The task of parametrical synthesis of management systems of electric drives in relation to technological machines of coastal installations is considered. The analysis of the known methods of the solution of this task is provided. Indicators of quality of management systems and methods of creation of optimality criterion are analyzed. The standard block diagram of the electric drive of technological machines of coastal installations is researched and the problem of parametrical synthesis by criterion of an inventory of working capacity is solved. An example of parametrical synthesis of management systems of the electric drive with condition regulators which find more and more wide practical applications is reviewed. The optimum result by the chosen criterion is compared to the decision received when using of the generalized multiplicative optimality criterion. The conclusion about feasibility of application as optimality criterion is drawn, in case of the solution of a task of parametrical synthesis of management systems of electric drives, a working capacity inventory. The decision received by this criterion guarantees accomplishment of all requirements imposed to the electric drive and provides its high parametrical reliability.

Keywords: electric drive, management system, area of working capacity, parametrical synthesis, working capacity inventory.

REFERENCES

1. Andrianov, E. N., A. V. Saushev, and D. I. Troyan. “Modeling of the mechanical systems of the marine cargo handling equipment by means of the electrical analogy method.” *Morskoy Vestnik* 1(53) (2015): 49–52.

2. Russian Federation. GOST 27803-91 Jelektroprivody reguliruemye dlja metalloobrabatyvajushhego oborudovanija i promyshlennyh robotov. Tehnicheskie trebovanija. M.: Izd-vo standartov, 1991.

3. Samoseyko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravlenija jelektroprivodom*. SPb.: Jelmor, 2007.

4. Batishchev, A. P. *Poiskovye metody optimalnogo proektirovanija*. M.: Sov. radio, 1975.

5. Anissimov, A. A., and S. V. Tararykin. “The Forming of Optimization Criterion in the Problems of Parametric Synthesis of the State Regulators in Electromechanical Systems.” *Mechatronics, automation, control* 10 (2009): 36–41.

6. Tararykin, S. V., and V. V. Tyutikov. “A robust model control for dynamic systems.” *Automation and Remote Control* 63.5 (2002): 730–742.

7. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelektrotehnicheskih ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

8. Abramov, O. V. “Possibilities and prospects of the functional-parametrical approach of reliability theory.” *Information Science and Control Systems* 4(42) (2014): 64–77.

9. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelektrotehnike: Uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2012.

10. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskih sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.

11. Saushev, A. V. “Methods and algorithms of parametrical synthesis of technical systems on the basis of areas of working capacity.” *International research journal* 5-3(47) (2016): 167–168. DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.090.

12. Saushev, A. V. Mathematical description of multimass mechanical systems of the electric drive / A. V. Saushev // *Electrical Technology Russia* 3 (2013): 27–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Бова Елена Владимировна — доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf _electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Aleksandr Vasil’evich — PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Bova Elena Vladimirovna — associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
kaf _electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-203-210
УДК 629.54:621.31

А. В. Григорьев,
Р. Р. Зайнуллин,
С. М. Малышев

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНО-ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА СУДОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ И ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время в Российской Федерации вводится в эксплуатацию большое количество морских, речных и судов смешанного плавания различного назначения с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) на базе системы электродвижения (СЭД). В связи с этим требуется существенное повышение уровня судовых инженеров электромехаников. Подготовка высококвалифицированных специалистов по вопросам эксплуатации ЕЭЭС с СЭД является довольно сложной научно-технической и методологической задачей. Решение данной проблемы связано с созданием универсального научно- исследовательского лабораторно-тренажерного комплекса (ЛТК). В статье приведен результат создания ЛТК, не имеющего аналогов в России, включающего в себя компьютерные модели СЭД, физические модели гребных электрических установок (ГЭУ) и тренажеры реальных судовых электротехнических систем. Отмечается, что уникальность ЛТК состоит в сочетании компьютерных и физических моделей и тренажеров. В статье рассматривается методология применения ЛТК в учебном процессе. На компьютерных моделях проводится теоретическое изучение переходных процессов в СЭД, физические модели гребных электродвигателей позволяют с использованием электротехнического оборудования и электроизмерительных приборов изучать физические процессы в ГЭУ. На тренажерных комплексах отрабатываются навыки технической эксплуатации ЕЭЭС с СЭД в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: лабораторно-тренажерный комплекс, компьютерные модели, физические модели, гребная электрическая установка, система электродвижения, лабораторная работа, экспериментальные исследования, тренажер.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации вводится в эксплуатацию большое количество морских, речных и судов смешанного плавания различного назначения, включая суда снабжения и ледоколы, танкеры и газовозы, буксиры и паромы, научно-исследовательские и рыбопромысловые суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) на базе системы электродвижения (СЭД) [1] – [3].

С целью всестороннего изучения физических процессов, протекающих в судовых ЕЭЭС и гребных электрических установках (ГЭУ) современных судов, и подготовки высококвалифицированных судовых специалистов по эксплуатации электрооборудования в 2015 г. компанией ЗАО «НПЦ «Электродвижение судов» на базе кафедры электродвижения и автоматики судов факультета судовой энергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) был создан научно-учебный лабораторно-тренажерный комплекс (ЛТК) судовых систем электродвижения (СЭД) и ГЭУ.

ЛТК предназначен для проведения научных исследований, теоретических, практических и лабораторных занятий курсантов и аспирантов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, а также осуществления послевузовской подготовки инженеров и преподавателей вузов. ЛТК используется для проведения курсов повышения квалификации судовых электромехаников, сотрудников судовладельческих компаний и классификационных обществ.

При создании ЛТК был решен ряд сложных научно-технических вопросов, связанных с созданием компьютерных моделей реальных ЕЭЭС с СЭД и их апробацией, физических моделей и макетов, на базе которых строятся физические лабораторные работы, тренажерных комплексов, позволяющих в реальном масштабе времени изучать сложные процессы управления судовыми системами с визуализацией процессов [4] – [8].

В состав ЛТК входят:

– компьютерный учебный класс с компьютерными лабораторными работами по СЭД и ГЭУ [9];

– комплекс лабораторных стендов судовых гребных электрических установок [10];

– тренажерные комплексы (ТК) судовой ЕЭЭС с ГЭУ танкера сжиженного природного газа и судовых СЭД с пропульсивным комплексом типа «Азипод» (ТК «Азипод»).

Компьютерное моделирование

Компьютерный учебный класс предназначен для проведения компьютерного моделирования современных ГЭУ и СЭД с целью изучения физических процессов, принципа действия и отработки навыков технической эксплуатации.

На компьютерных моделях реализованы следующие режимы эксплуатации СЭД и ГЭУ:

– работа в установившихся режимах (ход в свободной воде, ход на волнении, ход в ледовых условиях);

– работа в переходных режимах (разгон, торможение, реверс);

– работа в аварийных режимах (заклинивание гребного винта, поломка лопасти гребного винта, обесточивание) и др.

Компьютерные модели разработаны в пакете научного моделирования Simulink программы MATLAB. В лабораторных работах созданы компьютерные модели ГЭУ на базе асинхронных и синхронных гребных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением на постоянных магнитах, а также машин постоянного тока.

На рис. 1 представлена компьютерная модель ГЭУ с асинхронным электродвигателем и полупроводниковым преобразователем частоты на базе автономного инвертора.

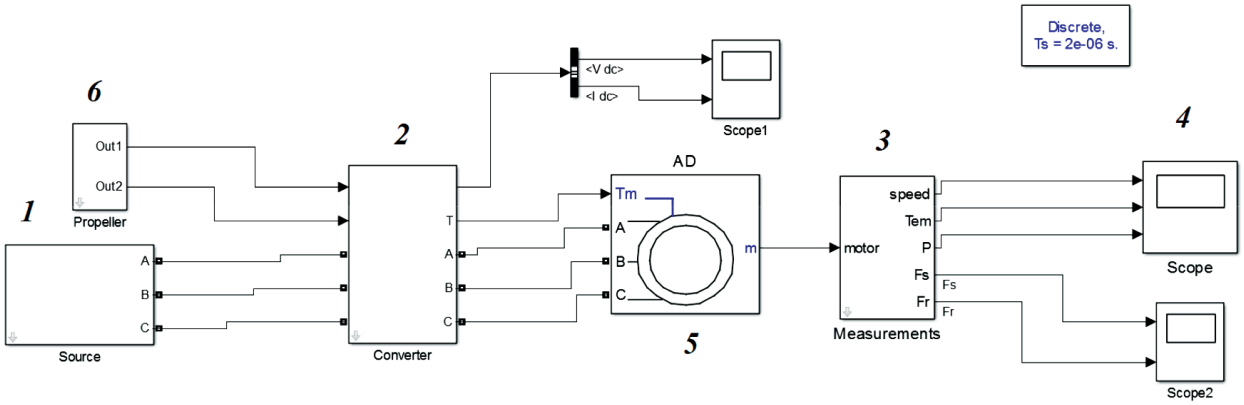


Рис. 1. Компьютерная модель ГЭУ с асинхронным электродвигателем:
1 — дизель-генератор; *2* — полупроводниковый преобразователь частоты;
3 — блок измерения физических переменных ГЭД; *4* — виртуальный осциллограф;
5 — асинхронный электродвигатель; *6* — гребной винт

В лабораторной работе проводятся экспериментальные исследования, в результате которых можно получить графики переходных процессов разгона, торможения (рис. 2) и реверса ГЭД, напряжения и тока ГЭД и ПЧ при ходе на свободной воде, во льдах, на волнении и при работе в аварийных режимах.

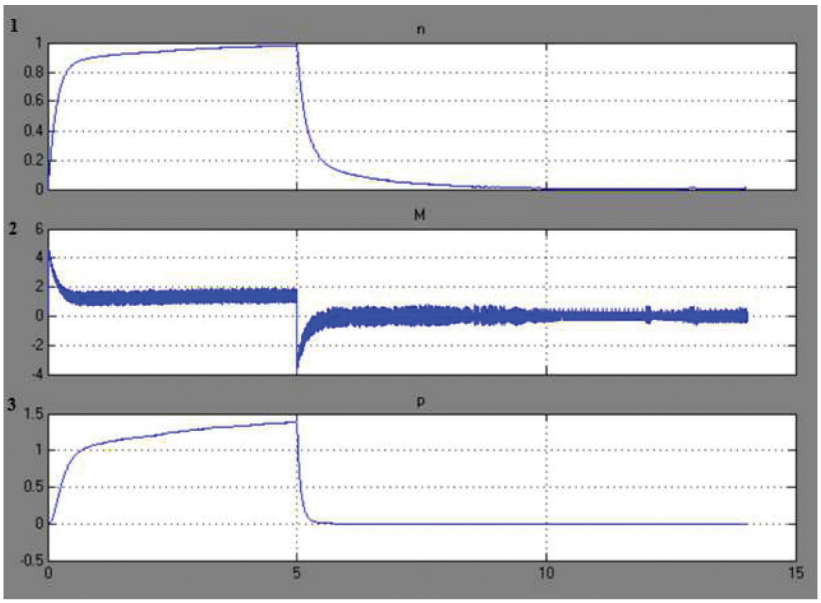


Рис. 2. Переходные процессы разгона и торможения ГЭД:
1 — переходная характеристика частоты вращения ГЭД;
2 — переходная характеристика электромагнитного момента ГЭД;
3 — переходная характеристика мощности ГЭД

Физическое моделирование (макетирование)

Лабораторные работы ГЭУ предназначены для изучения физических процессов в судовых СЭД и ГЭУ переменного и двойного (переменно-постоянного) рода тока с применением реального электротехнического оборудования и электроизмерительных приборов.

Целью проведения лабораторных занятий является изучение физических процессов в ГЭУ и СЭД и отработка навыков программирования и настройки микропроцессорных системах управления.

На компьютерных моделях реализованы следующие режимы эксплуатации СЭД и ГЭУ:

– работа ГЭУ на холостом ходу;

– работа ГЭУ по винтовой характеристике в установившихся режимах (ход в свободной воде, ход на волнении, ход в ледовых условиях);

– работа ГЭУ по винтовой характеристике в переходных режимах (разгон, торможение, реверс);

– работа ГЭУ в аварийных режимах (заклинивание гребного винта, поломка лопасти гребного винта и др.).

Состав типового лабораторного стенда СЭД:

– физическая модель гребной электроустановки (ГЭУ);

– нагрузочное устройство, моделирующее работу гребного винта;

– вспомогательное и измерительное оборудование, включающее персональный компьютер, мультиметр, USB осциллограф и электротехнический щит.

Фотография типового лабораторного стенда приведена на рис. 3.

Структурная схема лабораторного стенда, на котором можно моделировать ГЭУ переменного тока с асинхронным электродвигателем или ГЭУ двойного рода тока с управляемым выпрямителем, приведена на рис. 4. В состав лабораторного стенда входят: электродвигатель постоянного тока, асинхронный электродвигатель, полупроводниковый преобразователь частоты, полупроводниковый выпрямитель, дроссель, электрический щиток с защитно-коммутационной аппаратурой и др.

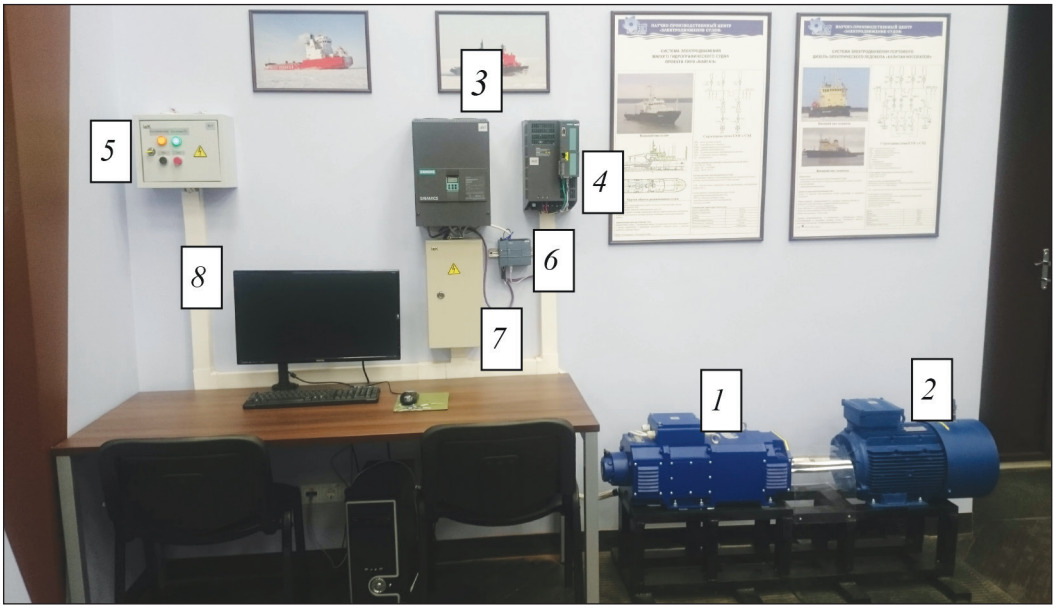


Рис. 3. Фотография лабораторного стенда:
1 — гребной электродвигатель; *2* — нагрузочный генератор;
3 — полупроводковый выпрямитель; *4* — полупроводниковый преобразователь частоты;
5 — электрораспределительный щит; *6* — контроллер;
7 — дроссель; *8* — персональный компьютер

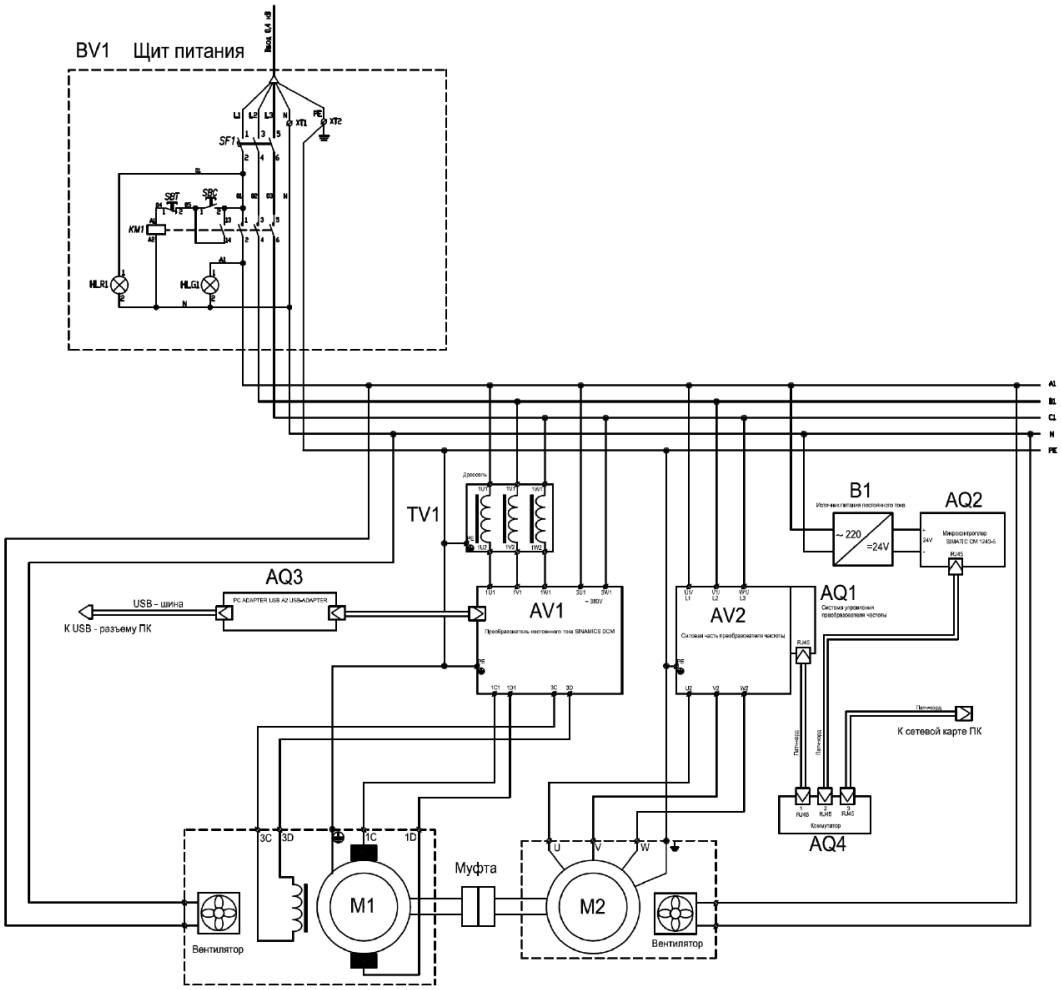


Рис. 4. Структурная схема лабораторного стенда

Переходный процесс разгона ГЭД и видеокадр панели управления представлены на рис. 5.

а) б)

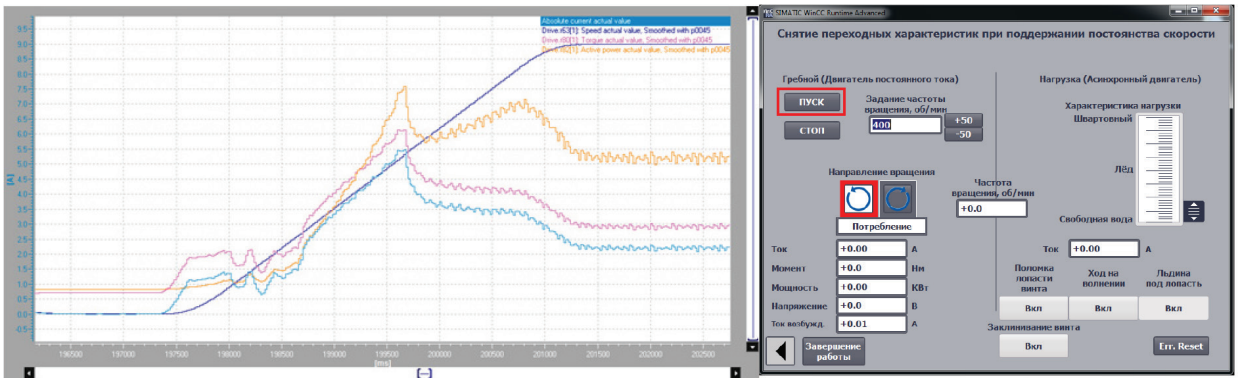


Рис. 5. Переходный процесс разгона ГЭД (*а*) и видеокадр панели управления (*б*)

Тренажерный практикум

Целью проведения тренажерного практикума является изучения принципа действия и основ эксплуатации современных СЭД и ГЭУ в реальном масштабе времени. Фотография тренажера ЕЭЭС с ГЭУ представлена на рис. 6.

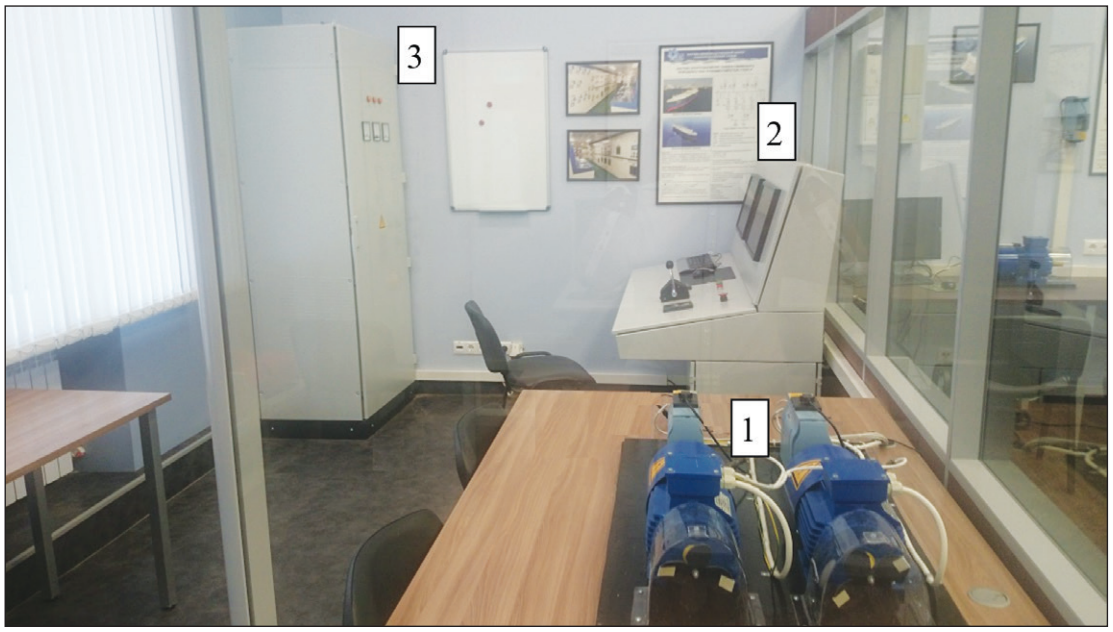


Рис. 6. Фотография тренажерного комплекса ЕЭЭС с гребной электроустановкой:
1 — физическая модель двухвальной ГЭУ; *2* — пульт управления; *3* — ГРЩ

Тренажер ЕЭЭС с ГЭУ предназначен для исследования принципа действия и отработки навыков технической эксплуатации современных судовых одновальных и двухвальных СЭД переменного тока с прямой передачей вращающего момента на винт, применяемых в составе электроэнергетических установок танкеров сжиженного природного газа. Структурная схема приведена на рис. 7.

Тренажер, за счет изменения компоновки, алгоритмов и законов регулирования, нагрузочных характеристик гребного винта позволяет моделировать работу ЕЭЭС с ГЭУ переменного тока с прямой передачей вращающего момента на винт.

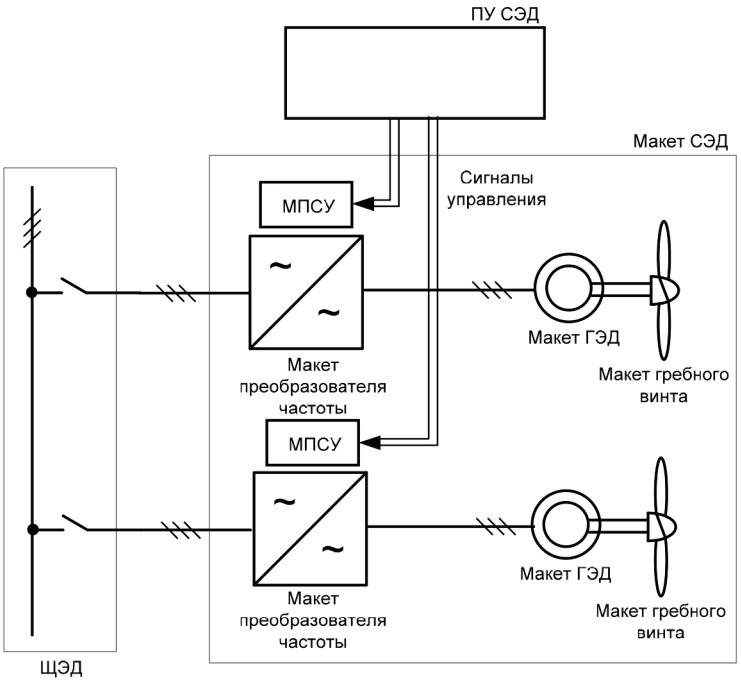


Рис. 7. Структурная схема тренажерного комплекса единой электроэнергетической систем с двухвальной ГЭУ

Видеокадр с отображением панели управления в момента запуска ГЭУ и разгона ГЭД представлен на рис. 8.

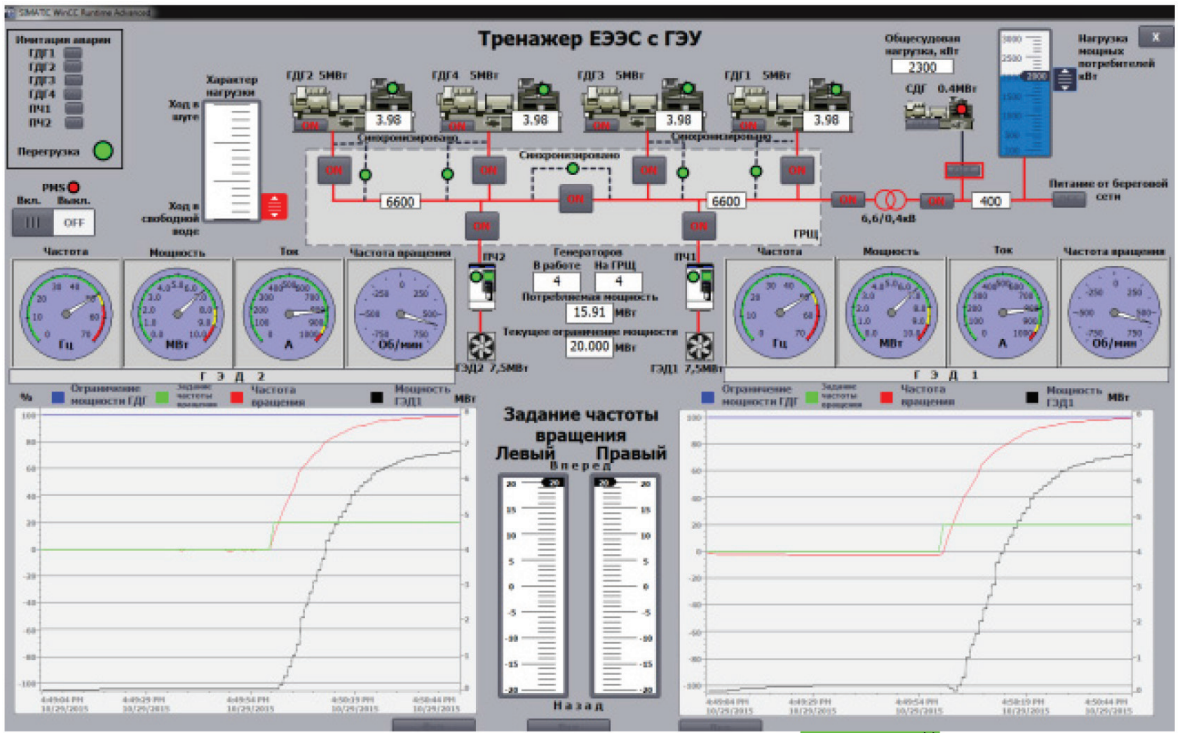


Рис. 8. Видеокадр пуска ГЭУ и разгона ГЭД

Выводы

1. На кафедре электродвижения и автоматики судов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова создан научно-исследовательский лабораторно-тренажерный комплекс современных и пер-

спективных ЕЭЭС с СЭД, который не имеет аналогов в учебных и научных заведениях Российской Федерации. В научно-исследовательском ЛТК наиболее полно на компьютерных и физических моделях реализованы все современные и перспективные ЕЭЭС и СЭД. На моделях возможно проведение экспериментальных исследований установившихся и переходных режимов эксплуатации судовых электротехнических систем, включая аварийные режимы.

2. При создании ЛТК был решен ряд сложных научно-технических вопросов, связанных с созданием компьютерных моделей реальных ЕЭЭС с СЭД, физических моделей и макетов, на базе которых строятся физические лабораторные работы и тренажерные комплексы, позволяющие в реальном масштабе времени изучать сложные процессы управления судовыми системами.

3. Научно-исследовательский ЛТК может использоваться не только в учебном процессе, но и для проведения научно-исследовательской работы в области судовой электротехники и электроэнергетики. На лабораторном комплексе возможно проведение экспериментальных исследований с целью обоснования технических решений при проектировании ЕЭЭС и СЭД и разработки алгоритмов управления сложными электротехническими объектами. ЛТК целесообразно использовать для повышения квалификации специалистов отрасли, научных сотрудников и преподавателей вузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григорьев А. В.* Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, В. И. Штрамбранд, Р. Р. Зайнуллин // Морской флот. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

2. *Григорьев А. В.* Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.

3. *Григорьев А. В.* Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4. — С. 76–78.

4. *Григорьев А. В.* Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 164–171.

5. *Gierusz W.* Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results / W. Gierusz // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 123. — Pp. 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.

6. *Yutao C.* Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // Energy Procedia. — 2012. — Vol. 17. — Part A. — Pp. 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.

7. *Wilflinger J.* Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilflinger, P. Ortner, L. Del Re., M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40–45. DOI:10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

8. *Mahmud K.* A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks / K. Mahmud, G. E. Town // Applied Energy. — 2016. — Vol. 172. — Pp. 337–359.

9. *Герман-Галкин С. Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.

10. *Гузанов А. Н.* Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики / А. Н. Гузанов, К. В. Недялков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — 59 с.

DESIGNING OF SCIENTIFIC-EDUCATIONAL LABORATORY-TRAINING COMPLEX OF SHIP ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS AND ELECTRIC PROPULSION PLANTS OF NEW GENERATION

In the present time in Russian Federation a large number of sea and river ships of different appointment with integrated electric power systems (IEPS) on the basis of electric propulsion systems (EPS) are putting into operation. This why significant increase of professional level of ship electrical engineers is needed. Training of highly qualified specialists in field of maintenance of modern IEPS with EPS is rather difficult scientific and methodologic problem. The solution of the problem is connected with development of universal research labora-

tory-training complex (LTC). In the article result of creation of LTC is showed, it has no analogs in Russia and includes computer models, physical models of electric propulsion plants (EPP) and training stations of real ship electrical systems. It is noted that uniqueness of LTC consists in combination of physical and computer models. In the article methodology of using of LTC in educational process is considered. On computer models theoreti-cal research of transitional processes in EPS is provided, physical models of electric propulsion motors with using of electrical equipment and electric measuring devices let to research physical processes in EPP. On training stations skills of technical maintenance of IEPS with EPS are working in real time.

Keywords: laboratory-training complex, computer models, physical models, electric propulsion plant, electric propulsion system, laboratory work, experimental research, training station.

REFERENCES

1. Grigorev, A. V., V. I. Shtrambrand, and R. R. Zajnullin. "Celesoobraznost primenenija SJeD na sudah vspomogatelnogo flota." *The Morskoy Flot (Marine Fleet)* 4 (2014): 38–40.

2. Grigorev, A. V., and R. R. Zajnullin. "Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.

3. Grigorev, A. V., V. V. Romanov'skiy, and R. R. Zaynullin. "Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 76–78.

4. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. "Analysis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 164–171.

5. Gierusz, Witold. "Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results." *Ocean Engineering* 123 (2016): 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.

6. Yutao, Chen, Zeng Fanming, and Wu Jiaming. "Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System." *Energy Procedia* 17 (2012): 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.

7. Wilflinger, Johann, P. Ortner, L. Del Re., and M. Aschaber. "Simulation and control design of hybrid propulsions in boats." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 40–45. DOI:10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

8. Mahmud, Khizir, and Graham E. Town. "A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks." *Applied Energy* 172 (2016): 337–359.

9. German-Galkin, S. G. *Kompjuternoe modelirovanie poluprovodnikovyh sistem v MATLAB 6.0*. SPb.: KORONA print, 2001.

10. Guzanov, A. N., and K. V. Nedjalkov. *Modelirovanie sudovogo jelektrooborudovanija i sredstv avtomatiki*. SPb.: SPbGUVK, 1996.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
a.grigorev@eds-marine.ru
Зайнуллин Руслан Ринатович — соискатель.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
zaynullin@eds-marine.ru
Малышев Сергей Михайлович — аспирант.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
malyshev@eds-marine.ru, kaf _saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev Andrey Vladimirovich —
PhD, associate professor.
Jelektrodvizhenie sudov
a.grigorev@eds-marine.ru
Zaynullin Ruslan Rinatovich — applicant.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
zaynullin@eds-marine.ru
Malyshev Sergey Mihaylovich — postgraduate.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
malyshev@eds-marine.ru, kaf _saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223
УДК. 621.398.04

А. Е. Сазонов,
В. В. Сахаров,
А. А. Чертков

МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА НАБЛЮДАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

Рассматривается метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна на основе теории модальных регуляторов. Современные системы судовождения, их технические средства характеризуются высокой размерностью и сложностью. Их компонентами являются: авторулевые, системы управления движительным комплексом, динамические системы позиционирования, регуляторы, фильтры, средства мониторинга, оценки переменных состояния, динамические наблюдатели, идентификаторы и др. Модели оценки количественных и качественных показателей систем управления судном основаны на применении обобщенной математической модели, которая может принимать различные формы в зависимости от влияния многочисленных факторов на ее структуру и параметры. Применение класса простых моделей динамики управления танкерами, предложенных Номото, для синтеза оптимальных регуляторов и параметрической настройки авторулевых связано с необходимостью учета изменений их параметров, восстановлением вектора состояния по неполным измерениям. Адекватность динамики простых моделей и объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, можно повысить на основе применения современных алгоритмов анализа, синтеза и оптимизации автоматических систем, инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий с применением основных положений модального управления.

Цель работы состоит в улучшении качественных показателей удержания судна на курсе с авторулевым комплексом — замкнутой системы управления — путем выбора требуемого спектра матрицы состояния, модального метода параметрической оценки коэффициентов регулятора и синтеза динамических наблюдателей по вектору выхода, содержащего одну из переменных состояния системы. Рассматривается метод синтеза динамического наблюдателя Луенбергера полной размерности, отличающийся тем, что в нем учтена структура матрицы состояния модели судна с регулятором Аккермана, допускающая при соблюдении условий управляемости и наблюдаемости выбор структуры стабилизирующей части матрицы наблюдателя в форме векторов — столбцов с ненулевыми элементами, что позволяет существенно упростить процедуру синтеза. Выполнен расчет наблюдателя для оценки вектора переменных состояния супертанкера дедвейтом 150 тыс. т.

Ключевые слова: судно, модель, управление, наблюдатель, матрица, векторы выхода и состояния, модальный метод, алгоритм, синтез.

Современные системы управления судном и судовыми энергетическими установками представляют собой автоматизированные технические комплексы высокой сложности, предназначенные для эффективного выполнения операций, определяемых назначением и спецификой работы судна в конкретных условиях. Обеспечение высокой производительности автоматизируемых объектов при выполнении грузоперевозок, пассажирских перевозок, паромных операций, перевозок нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа, а также комплекса операций по бурению скважин при освоении прибрежного шельфа, прокладки труб и кабелей различного назначения, выполнении дноуглубительных работ и т. п. потребовали качественных изменений в составе систем и средств автоматического и автоматизированного управления, построенных на базе последних научных и технических достижений в данной предметной области [1].

Высокоточные системы позиционирования, созданные на основе технологий спутниковой навигации, системы контроля и управления, базирующиеся на современных вычислительных сре-

дах и методах оптимизации, позволяют на качественно новом уровне решать задачи совершенствования управления судном с использованием компьютерных моделей динамики управляемых морских объектов различного назначения. Повышение точности и надежности управления судном на курсе с обеспечением устойчивости движения по отношению к возмущениям угла курса, угла дрейфа и угловой скорости вращения связано с совершенствованием динамической модели, выбором параметров авторулевых и измерениями переменных состояния [2].

Получение достоверной информации о векторе переменных состояния судна играет решающую роль при изучении эволюционных процессов и синтезе управляющих функций, обеспечивающих целенаправленное поведение динамического объекта во времени и пространстве. Однако вектор фазовых координат зачастую недоступен для измерения по различным причинам. В этом случае вектор фазовых координат можно оценить по вектору выхода. Вследствие того, что измерения выполняются с погрешностью, а также ввиду наличия шумов на входе системы, требуется получать оценки, базирующиеся на процедурах стохастической фильтрации [3].

Для измерений переменных состояния, наряду с существующими, могут быть предложены математические датчики информации, построенные на динамических наблюдателях и оценивателях. Их практическое применение на судах должно способствовать повышению энергетической эффективности и качества работы судовых систем и средств автоматики, а также обеспечению надежности и безопасности в случаях возникновения неисправностей датчиков информации [4].

Проблеме конструирования динамических наблюдателей состояния как линейных, так и нелинейных систем в отечественной и зарубежной литературе уделяется большое внимание [5], [6]. В современной теории управления существует ряд эффективных методов ее решения [7]. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для восстановления переменных состояния по ограниченному числу измеряемых координат на конкретном объекте имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе их синтеза [8].

Наблюдатель представляет собой динамическую систему с двумя входами, которыми являются вектор управления наблюдаемой системы и вектор выхода. Эти векторы должны быть измеряемыми. Процедура синтеза наблюдателя состоит в получении структуры и параметров динамической системы, отвечающей определенным условиям, например, условиям Луенбергера, которые придают этой динамической системе требуемые свойства по восстановлению недостающих координат вектора состояния по вектору выхода. Модель наблюдателя представляется в форме пространства состояний. Условия Луенбергера обеспечивают процесс наблюдения на всем временном интервале, если начальные условия наблюдателя и наблюдаемой системы совпадают. Если же такое совпадение не обеспечено, то восстановление недостающих переменных состояния гарантируется по окончании переходного процесса в наблюдателе. Собственные значения матрицы состояния наблюдателя выбираются, как правило, на порядок меньше собственных значений матрицы состояния наблюдаемой системы, что обеспечивает быстрое завершение переходного процесса в наблюдателе. При нормальном функционировании наблюдателя величина погрешности — разность вектора выхода системы и вектора выхода наблюдателя — также должна уменьшаться с течением времени, что определяется свойствами асимптотической устойчивости наблюдателя как динамической системы. Наиболее простым по структуре и процедуре синтеза следует считать наблюдатель для инвариантной во времени системы. Применение наблюдателей в оптимальных системах значительно улучшает режимы функционирования последних.

Модальный метод синтеза наблюдателей рассмотрим применительно к математической модели в пространстве состояний для инвариантной во времени системы:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \quad (1)$$

$$y(t) = D \cdot x(t), \quad (2)$$

где A — $(n \times n)$-матрица; B — $(n \times k)$-матрица; D — $(r \times n)$-матрица постоянных коэффициентов; $x(t)$ — $(n \times 1)$-мерный вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ — векторы управления и выхода соответству-

ющей размерности. Если $r < n$, то измерения выполняются лишь части переменных состояния. Для системы управления с одним входом $k = 1$.

Для восстановления всех переменных состояния по вектору выхода $y(t)$ используем динамический наблюдатель, построенный на базе матричного уравнения Луенбергера, что позволяет существенно упростить процедуру синтеза с одновременной оценкой параметров регулятора Аккермана в цепи обратной связи управляемого объекта по заданному спектру матрицы замкнутой системы. Матричное уравнение Луенберга имеет следующий вид [9]:

$$T \cdot A - F \cdot T = H. \tag{3}$$

Здесь предполагается, что существует матрица преобразования T, удовлетворяющая приведенному матричному уравнению (3), и что матрицы постоянных коэффициентов F и H соответствующей размерности образуют структуру динамического наблюдателя

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t) + T \cdot B \cdot u(t). \tag{4}$$

Заметим, что на вход наблюдателя (4) подаются два сигнала: $x(t)$ и $u(t)$. Поясним принцип синтеза наблюдателя на простой задаче. Предположим, что в уравнении (1) вектор $u(t) = 0$. Тогда переходный процесс в системе определится с помощью матричного экспоненциала

$$x(t) = e^{At} x(0),$$

где $x(0)$ — вектор начальных условий.

Теперь при нулевом сигнале управления подадим $x(t)$ на вход наблюдателя (4). Получим уравнение динамической системы

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t), \tag{5}$$

где F и H — матрицы наблюдателя, подлежащие определению на основании условия (3). В основе синтеза наблюдателя лежит следующее утверждение: если существует такая матрица преобразования T, что удовлетворяется матричное уравнение (3)

$$T \cdot A - F \cdot T = H,$$

то при соблюдении этого условия можно утверждать, что будет соблюдаться равенство $z(t) = T \cdot x(t)$ для $t \geq 0$.

Если известны начальные условия объекта и наблюдателя, причем

$$z(0) = T \cdot x(0), \tag{6}$$

то наблюдению подлежат текущие значения вектора состояния для всех $t \geq 0$. Если же условие (6) не соблюдается, то $z(t) \approx T \cdot x(t)$ с момента $t \geq t_p$, где t_p — время переходного процесса наблюдателя (5).

Докажем это утверждение. Если существует линейное преобразование $z(t) = T \cdot x(t)$, то

$$\dot{z}(t) - T \cdot \dot{x}(t) = F \cdot z(t) + (H - T \cdot A) \cdot x(t) = F\left[z(t) - T \cdot x(t)\right]. \tag{7}$$

Введем вектор ошибки

$$s(t) = z(t) - T \cdot x(t). \tag{8}$$

Тогда уравнение (7), с учетом равенства (8), можно записать следующим образом:

$$\dot{s}(t) = F \cdot s(t). \tag{9}$$

Решение (9) также определяется с помощью матричной экспоненты и вектора начальных условий:

$$s(t) = e^{Ft} \cdot s(0). \tag{10}$$

Из (10) следует, что если $s(0) = 0$, то $s(t) = 0$. Следовательно, в переходном режиме

$$s(t) = z(t) - T \cdot x(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad z(t) = T \cdot x(t). \tag{11}$$

Если же $s(t) = z(t) - T \cdot x(t) \neq 0$, т. е. отсутствует информация о векторе начальных условий управляемой системы (1) либо наблюдателя (5), переходный процесс можно найти с помощью уравнения

$$z(t) = T \cdot x(t) + e^{Ft}\left[z(0) - T \cdot x(0)\right]. \tag{12}$$

Если структуру матрицы F выбрать так, чтобы переходный процесс в наблюдателе на временном интервале $(0 - t_p)$ завершался значительно быстрее, чем в системе (1), то второе слагаемое в правой части уравнения (12) при $t > t_p$ практически будет равно нулю и будет также выполнено условие $z(t) \approx T \cdot x(t)$.

В работах по теории наблюдателей показано, что существует единственное решение линейного уравнения (3) относительно T, если матрицы A и F не имеют общих собственных чисел.

Теперь обобщим полученный результат на систему (1) с ненулевым входом. Умножим это уравнение на матрицу T слева и воспользуемся моделью наблюдателя (4), т. е. подадим на вход наблюдателя (5) сигнал управления $T \cdot B \cdot u(t)$:

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + H \cdot x(t) + T \cdot B \cdot u(t).$$

Тогда уравнение (7) примет следующий вид:

$$\dot{z}(t) - T \cdot \dot{x}(t) = F \cdot z(t) + (H - T \cdot A) \cdot E(t) + (T \cdot B - T \cdot B) \cdot u(t).$$

Следовательно, переходный процесс в наблюдателе при компенсации погрешности наблюдений не зависит от сигнала управления $u(t)$. Поэтому наблюдатель для системы можно рассчитывать в предположении отсутствия сигнала управления с последующим использованием результатов расчета для случаев с ненулевым входом.

Для получения наблюдателя в виде $z(t) = x(t)$ необходимо в уравнении (3) выбрать $T = I$ (I — единичная матрица). Тогда наблюдатель должен представляться динамической моделью той же размерности, что и размерность системы, поскольку

$$F = A - H. \tag{13}$$

Матрица H в уравнении (13) может состоять из двух блоков. Первый блок представляет собой преобразователь вектора выхода системы, а второй определяется структурой входа наблюдателя. Структура наблюдателя для системы управления курсом судна, а также морских подвижных управляемых объектов со спецификой морского судна непосредственно связана с математическими моделями.

Математическая модель судна представляется сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений, интегрирование которых возможно только численными методами с направленностью на результаты, пригодные для решения практических задач [10]. Применение компьютерных технологий, реализованных вычислительными средами в форме модулей и блоков, может кардинально расширить данную предметную область исследований при должном научном обосновании получаемых практических результатов. В среде MATLAB таким инструментарием можно считать Marine GNC Toolbox, в котором содержатся следующие модули: управления, внешней среды, генерирования траекторий движения, модели судна, навигации, модуль с набором утилит. Инструментарий также содержит модуль с многочисленными примерами использования элементов других модулей и блоков в совокупности со средствами MATLAB для получения конкретных решений [11].

Практика показывает, что речные водоизмещающие суда, как правило, являются неустойчивыми на курсе, а их диаграммы управляемости характеризуются наличием гидродинамического «люфта» [12]. Для их удержания на заданной траектории необходим определенный тип авторулевого в замкнутой системе с модулями предиктивного управления, управления по модели следования, модального управления и оптимизации [11]. Оптимизация режимов движения судна

по заданной траектории в условиях воздействия ветра и волнения по критерию минимума среднеквадратичного отклонения может быть реализована с помощью оценивателей, базирующихся на фильтрах Калмана–Бьюси [3].

При малых отклонениях переменных состояния от рабочей точки для синтеза систем управления судном используются линейные модели [13]. Наиболее простыми принято считать обобщенные модели Номото первого, второго и третьего порядков [14]. Их практическое применение базируется на возможности сильного редуцирования реального динамического процесса к одной из обобщенных моделей путем «пригонки» параметров к эксперименту средствами параметрической идентификации [15]. Модели нелинейных систем управления судном, с учетом специфики воздействия на объект внешних сил и моментов, в допустимой области вариации параметров, как правило, приводятся к линейным [13].

Динамические модели судна в форме пространства состояний, используемые в практике управления супертанкерами и другими водоизмещающими судами, предпочтительнее иных форм, поскольку позволяют применить весь арсенал методов матричного анализа и инструментарии среды MATLAB для решения комплекса научно-технических задач на базе различных технологий [16], [17]. В этой связи для синтеза динамического наблюдателя в работе принята структура модели супертанкера следующего вида [4], [17]:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + b \cdot u(t),$$

где матрицы A и b в уравнении (1), согласно работе [17], можно записать следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Поскольку собственные значения матрицы A

$$\lambda_1 = 0; \quad \lambda_{2,3} = \frac{1}{2} \cdot \left(a_{11} + a_{22} \pm \sqrt{a_{11}^2 + a_{22}^2 - 2 \cdot (a_{11} \cdot a_{22} - 2 \cdot a_{21} \cdot a_{22})} \right),$$

объект является неустойчивым, и необходимо синтезировать регулятор для обеспечения требуемых динамических свойств системы с обратной связью по вектору состояния. Используя (14), получим матрицу замкнутой системы

$$A_7 = A - b \cdot K = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1 \cdot K_1 & a_{12} - b_1 \cdot K_2 & -b_1 \cdot K_3 \\ a_{21} - b_2 . K_1 & a_{22} - b_2 \cdot K_2 & -b_2 \cdot K_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

с регулятором $K = [K_1 K_2 K_3]$ для каждого режима с известными численными значениями элементов соотношений (14). Отметим также, что в модели (15) существует однозначная связь между коэффициентами характеристических полиномов замкнутой, разомкнутой систем и элементами матрицы регулятора. Коэффициенты регулятора выбираются так, чтобы матрица $A_з$ была гурвицевой с заданным спектром. Для полностью управляемой системы это означает существование и обоснованность выбора модального управления по состоянию с последующим получением характеристического полинома замкнутой системы с помощью регулятора в цепи обратной связи.

Модальный метод синтеза систем управления является наиболее мощным, теоретически обоснованным методом, широко используемым на практике [18]. Применительно к системам управления судном на курсе модальный метод позволяет автоматически корректировать параметры авторулевого при изменении условий плавания, получать желаемый вид переходного процесса с необходимыми качественными показателями на основе нормированных полиномов ряда фильтров (Баттерворта, Бесселя и др.), выполнять операции восстановления вектора состояния по вектору выхода при неполных измерениях. Метод связан с оптимальными решениями класса задач АКОР (аналитического конструирования оптимальных регуляторов), что позволяет обо-

сновывать выбор спектра матрицы $A_з$ по оценке коэффициентов весовых матриц интегрального критерия качества, используемого в задачах АКОР. При наличии численных значений параметров системы (1) со структурой матриц (14) с помощью модального метода устанавливается однозначно связь между коэффициентами полиномов разомкнутой и замкнутой систем. Это означает, что параметры регулятора можно оценить с помощью простого алгоритма модального управления, состоящего из следующих операций:

1) получение численных значений элементов матриц (14);

2) выбор собственных чисел матрицы $A_з$;

3) расчет регулятора путем применения функции Аккермана и оценки элементов $A_з$ по формуле (15);

4) построение характеристического полинома замкнутой системы с определением корней, численно равных собственным значениям $A_з$.

Последняя операция алгоритма предусмотрена для проверки корректности вычислений.

Рассчитаем коэффициенты регулятора $K = [K_1 K_2 K_3]$ по алгоритму для авторулевого танкера дедвейтом 250 тыс. т. Ненулевые элементы матриц (14) математической модели судна в грузу имеют численные значения [17]:

$a_{11} = -0.01306$; $a_{12} = -8.639$; $a_{21} = -0.00009309$; $a_{22} = -0.04314$;

$b_1 = 0.07037$; $b_2 = -0.0004592$.

Выберем собственные числа матрицы $A_з$ в уравнении (15):

$\lambda_1 = -0.05704$; $\lambda_{2,3} = -0.01988 \pm i \cdot 0.014217$.

Для расчета регулятора по способу Аккермана сначала из выбранных собственных значений сформируем вектор-столбец

$$p = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T,$$

а затем при соблюдении синтаксиса оператора *acker* получим оценку коэффициентов K,

$$K = \text{acker}(A, b, p) = [0.1476 \; -65.7976 \; -2.7154].$$

В результате получим матрицу $A_з$ системы с регулятором, которую для проверки корректности вычислений приведем в полном формате:

$$A = \begin{bmatrix} -0.023445757810724 & -4.008825298651207 & 0.191080317215991 \\ -0.000025317654019 & -0.073354242189276 & -0.001246896144175 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для проверки можно воспользоваться функцией $eig(A_з)$, которая возвращает ранее выбранные элементы вектора p.

Синтез наблюдателя произведем с использованием функций инструментария *Symbolic Toolbox*. Это позволит придать вычислительному алгоритму свойства универсальности при вариации параметров, структуры модели судна и назначении собственных чисел матрицы состояния наблюдателя.

Предположим, что размерность выхода $y(t)$ равна $(r \times 1)$, где $r < n$. Тогда модель наблюдателя, с учетом уравнения (2), будет иметь следующий вид:

$$\dot{z}(t) = F \cdot z(t) + G \cdot y(t), \tag{16}$$

где $H = G \cdot D$. (17)

В процессе синтеза наблюдателя матрица D размерности $(r \times n)$ не изменяется, а G размерности $(n \times r)$ может выбираться произвольно. Однако при выборе G следует иметь в виду, что динамические свойства наблюдателя полностью определены матрицей

$$F = A - G \cdot D. \tag{18}$$

Применительно к модели судна, с учетом ее структуры, для синтеза динамического наблюдателя Луенбергера полной размерности в уравнении (18) можно выбрать матрицу $G = [g_1\, g_2\, g_3]^T$. Тогда $D = [d_1\, d_2\, d_3]$ можно представить вектором-строкой, элементы которой принимают последовательно значения: $D_1 = [1\ 0\ 0]$, $D_2 = [0\ 1\ 0]$ и $D_3 = [0\ 0\ 1]$. Выбор структуры стабилизирующей части матрицы наблюдателя (18) в форме векторов-столбцов с ненулевыми элементами позволяет существенно упростить процедуру синтеза. В первом случае, согласно (2), при соблюдении условий управляемости и наблюдаемости по измерениям первой координаты состояния объекта можно восстановить вторую и третью координаты, во втором — первую и третью, а в последнем — по измерениям третьей переменной состояния оценить первую и вторую. Матрицы наблюдателей с введением стабилизирующей составляющей в рассматриваемых трех вариантах измерения имеют структуру:

$$F_1 = \begin{bmatrix} a_{11} - g_1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} - g_2 & a_{22} & a_{23} \\ -g_3 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} - g_4 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - g_5 & a_{23} \\ 0 & 1 - g_6 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} - g_7 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} - g_8 \\ 0 & 1 & -g_9 \end{bmatrix}.$$

В матрице

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

содержатся элементы a_{ij}, где $i = 1, 2$; … $j = 1, 2, 3$, … с численными значениями, приведенными ранее в полном формате. В составе собственных чисел матрицы A_3 содержится пара комплексно-сопряженных значений с отрицательной вещественной частью, что свидетельствует о достижении требуемого быстродействия при небольшом перерегулировании. Этот режим был установлен на танкере в полном грузу. Поскольку собственные числа матриц F_1, F_2 и F_3 не должны совпадать со значениями, содержащимися в векторе $p = [\lambda_1\, \lambda_2 \lambda_3]^T$, для обеспечения устойчивости динамических наблюдателей при требуемом быстродействии выберем их равными следующим вещественным отрицательным значениям:

$$m = [m_1\, m_2\, m_3]^T = [-0.06\ -0.05\ -0.04]^T. \tag{19}$$

Полином наблюдателей со стабилизирующей частью, имеющий корни m_1, m_2 и m_3, приведенные в (19), представим в следующем виде:

$$z = (x - m_1) \cdot (x - m_2) \cdot (x - m_3) = x^3 + 0.15 \cdot x^2 + 0.074 \cdot x + 0.00012.$$

Полиномы наблюдателей, соответствующие матрицам F_1, F_2 и F_3, получим с помощью функций инструментария *Symbolic Toolbox*:

$$Z_n = a^3 + d_{1j} \cdot a^2 + d_{2j} \cdot a + d_{3j},$$

где $j = 1, 2, 3$.

Приравняем коэффициенты Z_n с неизвестными g_i, где $i = 1$ … 9, численным значениям z. В результате будем иметь систему алгебраических уравнений:

$$d_{1j} = 0.15;\ d_{2j} = 0.074;\ d_{3j} = 0.00012.$$

Решение для $j = 1$ определяет стабилизирующую часть наблюдателя G_1 при измерении первой координаты:

$$G_1 = [g_1\, g_2\, g_3] = [0.0532 \quad -0.0001 \quad 0.0018].$$

Аналогично для $j = 2$, т. е. при измерении второй координаты, получим G_2:

$$G_2 = [g_4\ g_5\ g_6] = [5.6419 \quad 0.0532 \quad -2.5219].$$

Если $j = 3$, элементы вектора G_3 принимают значения

$$G_3 = [g_7\ g_8\ g_9] = [-0.5629 \quad -0.0006 \quad 0.0532].$$

Согласно (18), определим матрицы:

$$\begin{aligned} F_1 &= A_з - G_1^T \cdot D_1; \\ F_2 &= A_з - G_2^T \cdot D_2; \\ F_3 &= A_з - G_3^T \cdot D_3. \end{aligned} \tag{20}$$

Для моделирования системы составим блочную матрицу S_j следующего вида:

$$S_j = \begin{bmatrix} A_7 & 0_{3\times3} \\ \mathrm{G}_j^T \cdot D_j & F_j \end{bmatrix}, \tag{21}$$

где $j = 1, 2, 3$.

Теперь, подставив численные значения элементов матриц в (21), мы можем сформировать *LTI*-объект в форме пространства состояний, что позволяет использовать функции инструментария *Control Toolbox* для моделирования режимов работы наблюдателей. С этой целью, согласно синтаксису функции *ss*, введем матрицы $B1 = [0\ 0\ 0.425\ 0\ 0\ 0.425]^T$; $C1 = eye(6)$; $D1 = = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$. Создадим обобщенные системы

$$sysL_j = ss(S_j, B, C1, D1) \tag{22}$$

и произведем их моделирование при различных начальных условиях объекта и наблюдателя. Введем вектор состояния обобщенной системы

$$v = [v1\ v2\ v3\ v4\ v5\ v6]^T,$$

где $v1$, $v2$, $v3$ — переменные состояния объекта, а $v4$, $v5$, $v6$ — соответствующие им переменные состояния наблюдателя.

Если известен вектор начальных условий

$$v0 = [v01\ v02\ v03\ v04\ v05\ v06],$$

причем $v01 = v04$, $v02 = v05$ и $v03 = v06$, то время переходного процесса в наблюдателе, согласно (12), практически равно нулю, и для всех $t \geq 0$ на всех режимах соблюдаются равенства:

$$v1(t) = v4(t),\ v2(t) = v5(t) \text{ и } v3(t) = v6(t).$$

В других случаях динамический наблюдатель обеспечивает качественный режим восстановления неизмеряемых переменных состояния объекта на временном интервале $t \geq t_p$, где t_p — время переходного процесса в наблюдателе.

Моделирование выполнено при входном сигнале прямоугольной формы. Векторы начальных условий задаются так, чтобы можно было увидеть на графиках переходные процессы в обобщенных системах и, в частности, оценить время переходного процесса в наблюдателях.

На рис. 1 приведены результаты моделирования системы с наблюдателем S_1 при измерении $v1(t)$. Вектор начальных условий принят равным

$$v0 = [0 \quad 0.003 \quad 0.005 \quad -0.6 \quad -0.003 \quad 0.06]^T.$$

Из рисунка видно, что переходный процесс в наблюдателе при измерении $v1(t)$ практически завершается за время $t_p \leq 210$ с.

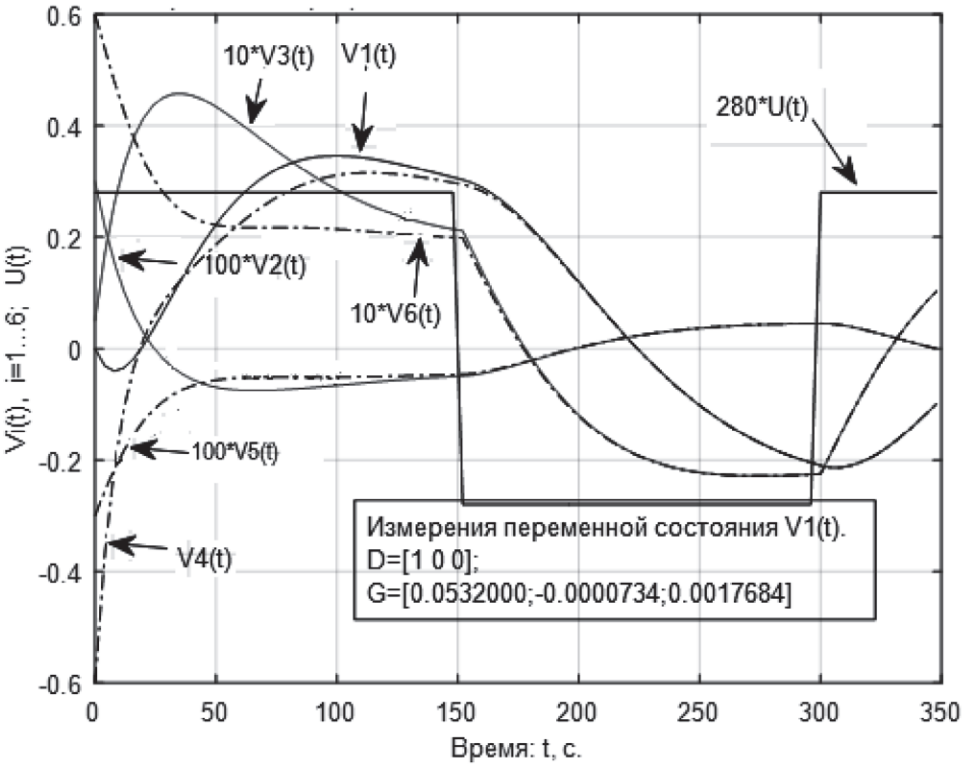


Рис. 1. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_1

На рис. 2 приведены результаты моделирования системы с наблюдателем S_2 при измерении $v2(t)$.

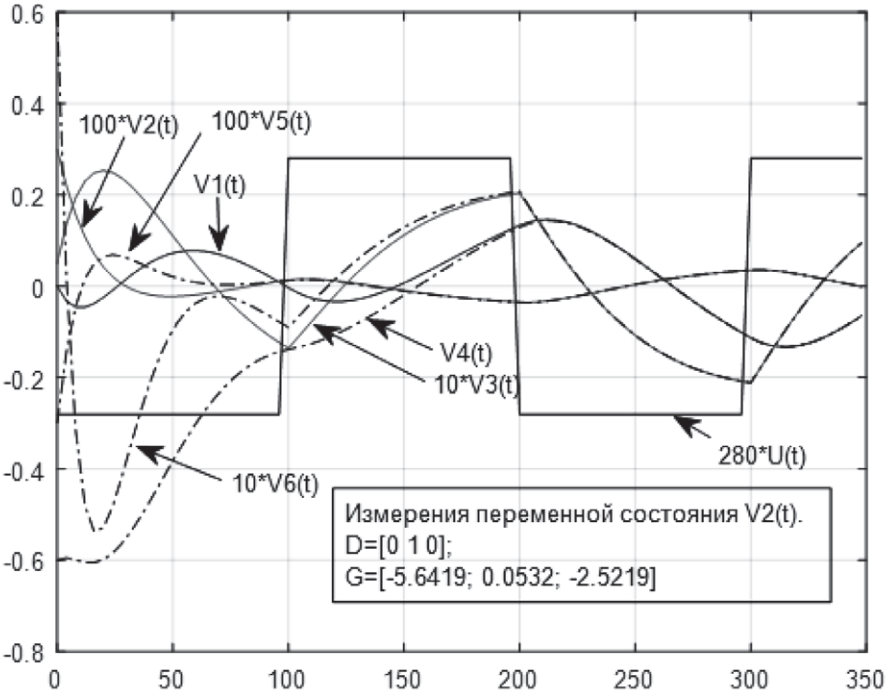


Рис. 2. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_2

Из рис. 2 следует, что время переходного процесса t_p в наблюдателе при измерении $v2(t)$ и векторе начальных условий

$$v0 = [0 \;\; 0.003 \;\; 0.005 \;\; -0.6 \;\; -0.003 \;\; 0.06]^T$$

составляет не более 210 с.

Переходный процесс при измерении $v3(t)$ представлен на рис. 3.

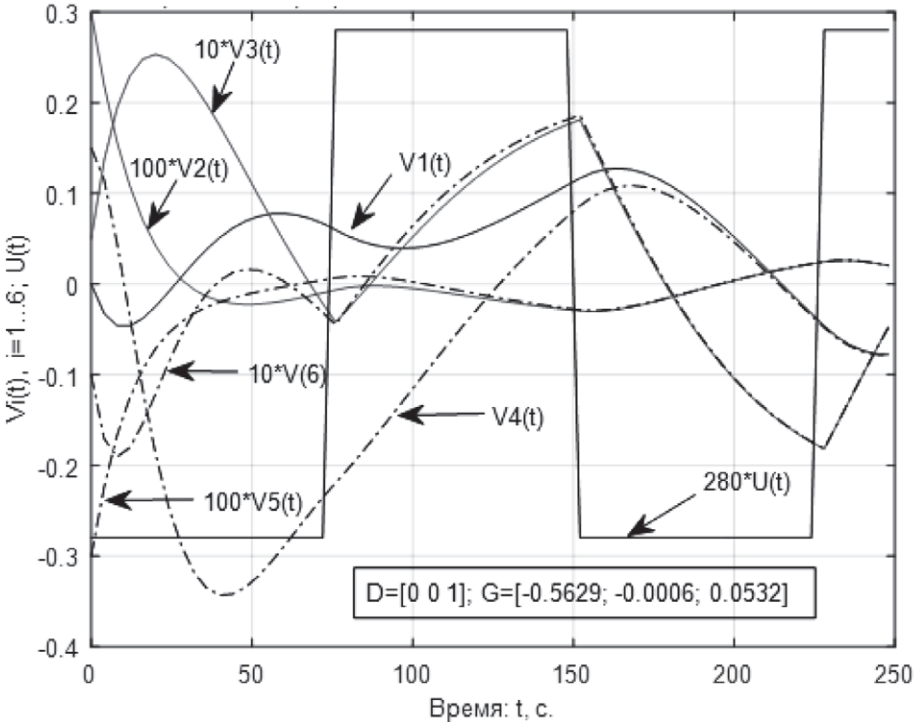


Рис. 3. Переходный процесс в обобщенной системе (22) с матрицей S_3

Для моделирования третьего наблюдателя с измеряемой координатой $v3(t)$ выбран вектор начальных условий

$$v0 = [0 \;\; 0.003 \;\; 0.005 \;\; 0.150 \;\; -0.003 \;\; -0.010]^T.$$

Время переходного процесса в наблюдателе, как и в предшествующих вариантах решения, составляет не более 210 с.

Модальный метод синтеза наблюдателя и алгоритм его реализации в приложении к модели судна с заданной структурой позволяют получить простые решения для управления свободными составляющими движения, однозначно определяемыми по совокупности собственных значений матрицы замкнутой системы. Для линейных моделей наблюдателей устойчивость гарантируется обоснованным выбором спектра, в котором не рекомендуется использовать кратные значения и численные значения, несущественно отличающиеся от корней характеристического полинома замкнутой системы управления курсом судна. Метод и алгоритм позволили синтезировать наблюдатели с одинаковым спектром с использованием одной из трех переменных состояния в качестве координаты выхода для полного восстановления вектора состояния при любых способах перекладки руля.

Выбор структуры стабилизирующей части наблюдателей путем введения векторов D_1, D_2 и D_3 позволяет предложить способ мониторинга датчиков угла курса, угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. Модальный метод оценки коэффициентов полиномов моделей с одним выходом для расчета G_1, G_2, G_3 предпочтительнее других способов вычислений, поскольку обеспечивает сходимость решения при выборе корней, близких к кратным значениям. Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления неизмеряемых переменных состояния, так и других переменных, измерение которых в судовых условиях затруднено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perez T.* Ship motion control. Course keeping and roll stabilization using rudder and fins / T. Perez. — Springer-Verlag London Limited, 2005. — 309 p.

2. *Басин А. М.* Ходкость и управляемость судов / А. М. Басин. — М.: Транспорт, 1968. — 255 с.

3. *Сахаров В. В.* Синтез оптимального оценивателя для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.

4. Автоматизация и повышение эффективности использования топлива на судах / ред. С. О. Барышников, А. А. Кузьмин, В. В. Сахаров, С. Н. Тарануха. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. — 390 с.

5. *Lewis F. L.* Optimal Control / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. — 3rd ed. — N. Y.: John Wiley and Sons, 2012. — 541 p.

6. *Witkowska A.* Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method / A. Witkowska, R. Smierzchalski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2012. – Vol. 22. — Is. 4. — Pp. 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.

7. *Pang C. K.* Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic system / C. K. Pang, F. L. Lewis, T. H. Lee // Transactions of the Institute of Measurement and Control. — 2010. — Vol. 32. — No. 2. — Pp. 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.

8. *Dhaliwal S. S.* State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems: Master thesis / S. S. Dhaliwal. — Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011. — 83 p.

9. *Гринкевич Я. М.* Наблюдатели и оцениватели состояния в судовых системах управления / Я. М. Гринкевич, В. В. Сахаров. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2001. — 193 с.

10. *Гофман А. Д.* Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2003. — 150 с.

11. *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.

12. *Садков А. В.* Моделирование динамики водоизмещающего речного судна, неустойчивого на курсе / А. В. Садков // Морской вестник. — 2012. — № 3. — С. 94–96.

13. *Tomera M.* Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.

14. *Nomoto K.* On steering qualities of ships / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // International Shipbuilding Progress. — 1957. — Vol. 4. — No. 35. — Pp. 354–370.

15. *Агарков С. А.* Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 7–11.

16. *Веремей Е. И.* Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е. И. Веремей, В. М. Корчанов, М. В. Коровкин, С. В. Погожев. — СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.

17. *Reid R. E.* Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: A feasibility study / R. E. Reid, B. C. Mears // Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1981 20th IEEE Conference on. — IEEE, 1981. — Pp. 181–187. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493

18. *Панкратов В. В.* Специальные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие / В. В. Панкратов, О. В. Нос. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. — Ч. I. Модальное управление и наблюдатели. — 48 с.

A MODAL METHOD FOR THE SYNTHESIS OF AN OBSERVER FOR HEADING CONTROL

A method for synthesis of an observer for heading control based on the theory of modal controllers considered. Modern systems of navigation, their technical facilities are characterized by high dimensionality and complexity. Their components are: gyro pilots, control systems, propulsion complex, dynamic positioning systems, controls, filters, monitoring tools, evaluation of state variables, dynamic observers, identifiers, etc.. Evaluation models of quantitative and qualitative indicators, ship control systems based on the use of generalized mathematical models, which can take different forms depending on the influence of numerous factors on its structure and parameters. The use of a class

of simple models of the dynamics of managing tankers, proposed by Nomoto, for the synthesis of optimal controllers and parametric settings of the autopilots is connected with necessity of accounting of changes of their parameters, the reconstruction of the state vector according to incomplete measurements. The adequacy of the dynamics and simple models of object functioning in the conditions of changing external environment, can be improved through the application of modern algorithms of analysis, synthesis and optimization of automatic systems and tools of computing environments and computer technologies with application of the main provisions of the of modal control. The technique of synthesis of dynamic observer of Luenberger complete dimension, characterized in that it takes into account the structure of the state matrix model of the vessel with the regulator Ackerman, permit subject to the conditions of controllability and observability of the choice of the stabilizing structure of the matrix of the observer in the form of vectors — columns with non-zero elements, which allows to simplify the synthesis procedure. The calculation of the observer for estimation of vector of state variables completed for supertanker with a deadweight of 150 thousand tons.

Keywords: ship, model, control, observer, matrix, output and state vectors, modal method, algorithm, synthesis.

REFERENCES

1. Perez, T. *Ship motion control. Course keeping and roll stabilization using rudder and fins.* Springer-Verlag London Limited, 2005.

2. Basin, A. M. *Hodkost' i upravlayemost' sudov.* M.: Izd-vo «Transport», 1968.

3. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. "Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.

4. Baryshnikov, S. O., A. A. Kuzmin, V. V. Saharov, and S. N. Taranuha, eds. *Automation and improving fuel efficiency in the courts*. Spb.: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2016.

5. Lewis, F. L., D. Vrabie, and V. L. Syrmos. *Optimal Control*. 3rd ed. N.Y.: John Wiley and Sons, 2012.

6. Witkowska, A., and R. Smierzchalski. "Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.4 (2012): 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.

7. Pang, C. K., F. L. Lewis., and T. H. Lee. "Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic system." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 32.2 (2010): 137–154. DOI: 10.1177/0142331209339868.

8. Dhaliwal, S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems. Master thesis. Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011.

9. Grinkevich, Ja. M., and V. V. Saharov. *Nabludateli i ocenivateli sostojanija v sudovyh sistemah upravlenija*. SPb.: SPGUWK, 2001.

10. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.

11. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "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.

12. Sadkov, A. V. "Modeling the dynamics of displacement river boat which is course-unstable." *Morskoy Vestnik* 3 (2012): 94–96.

13. Tomera, M. "Nonlinear controller design of a ship autopilot." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8

14. Nomoto, K., T. Taguchi, K. Honda, and S. Hirano. "On steering qualities of ships." *International Shipbuilding Progress* 4.35 (1957): 354–370.

15. Agarkov, S. A., and S. V. Pashentsev. "Parametric identification of the Nomoto generalized model using the apparatus of variational calculus." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 7–11.

16. Veremey, E. I., V. M. Korchanov, M. V. Korovkin, and S. V. Pogojev. *Kompjuternoe modelirovanie sistem upravlenija dvijeniem morskih podvijnyh ob'ektov.* SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.

17. Reid, R. E., and B. C. Mears. "Design of the steering controller of a supertanker using linear quadratic control theory: a feasibility study." *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1981 20th IEEE Conference on*. IEEE, 1981: 181–187. DOI: 10.1109/CDC.1981.269493.

18. Pankratov, V. V., and O. V. Nos. *Specialnye razdely teorii avtomaticheckogo upravlenija. Ch. I. Modalnoe upravlenie i nabljudateli: ucheb. Posobie*. Novosibirsk.: Izd-vo NGTU, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сазонов Анатолий Ефимович — чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *sazonst@yandex.ru*
Сахаров Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *_saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru*
Чертков Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *chertkov51@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sazonov Anatoliy Efimovich — corr. RAS, Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *sazonst@yandex.ru*
Saharov Vladimir Vasilevich — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *_saharov_@rambler.ru*
Chertkov Alexandr Alexandrovich — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *chertkov51@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-223-231
УДК 004.732.629.5-52

В. В. Вычужанин,
Н. О. Шибаева

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В статье приведены результаты анализа литературных источников, из которых следует актуальность поиска оптимальных вариантов по критериям качества для принятия конечного решения в целях повышения эффективности эксплуатации судовых сложных технических систем. Для достижения поставленной цели разработаны и исследованы модели многокритериальной и многопараметрической оптимизации технологических параметров эксплуатируемых сложных технических систем на примере судовой энергетической установки. При постановке и решении задачи оптимизации характеристик судовой энергетической установки определен набор независимых параметров, условий, определяющих допустимые их значения, получена целевая функция и выбран метод решения оптимизационной задачи на базе системного подхода. В результате решения задачи оптимизации определено множество альтернативных решений, соответствующих принципу оптимальности Парето и удовлетворяющих поставленным ограничениям. Полученные результаты оптимизации позволяют установить конкретные значения долевых мощностей и часовых расходов топлива главным двигателем, вспомогательным дизель-генератором, аварийным дизель-генератором, при которых судовая энергетическая установка энергоэффективна.

Ключевые слова: судовая энергетическая система, многокритериальная оптимизация, энергоэффективность.

Введение

Разработка и эксплуатация высокоэффективных технических систем и технологических процессов не обходится без применения новых технологий и невозможна без оптимального согласования существенного количества функциональных параметров, влияющих на эффективность систем. Основной задачей повышения эффективности сложных технических систем (СТС) и процессов является разработка виртуальных моделей, описывающих комплекс свойств и харак-

теристик подобных систем. Это позволяет осуществить поиск совокупности альтернативных проектных и эксплуатационных вариантов, являющихся наилучшими по тем или иным критериям качества для принятия конечного решения. Такой подход позволяет существенно сократить сроки и стоимость создания новых СТС, повысить эффективность их эксплуатации.

Применительно к решению задач повышения эффективности СТС в качестве цели может рассматриваться, например, повышение энергоэффективности [1] – [9]. В работе [1] рассмотрены вопросы оптимизации технических решений при комплектовании пропульсивных установок, а также по вспомогательным энергетическим установкам на стадии проектирования комплексов морской техники. В работе [2] автором уделено особое внимание освещению следующих тем: тепловая и механическая напряженность деталей цилиндропоршневой группы; нагрузочные, винтовые и ограничительные характеристики дизелей; характеристики совместной работы дизеля и газотурбонагнетателя с точки зрения обеспечения энергоэффективной эксплуатации. В работах [3], [4] анализируются результаты применения специализированного программного обеспечения при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем, рекомендуемого для использования с целью выделения характерных режимов работы систем и их реконфигурации, а также повышения оптимальности использования систем для сокращения трудоемкости обслуживания и оценки их работы после принятия мер по повышению энергоэффективности. В статье [5] описана оптимизация эксплуатационных процедур, встроенных в систему управления электропитанием с учетом безопасности и минимизации расхода топлива судном. Предлагаемый метод предназначен для использования при проектировании судовой системы энергоснабжения. Функция затрат и ограничения формулируются на основе расхода топлива. Данный метод рекомендуется использовать при решении задач, связанных с целью достижения максимальной экономии топлива. Оптимизация судовых энергетических систем на стадии проектирования проведена в работе [6], а оптимальное распределение нагрузки на дизель-генераторы проанализированы в [7]. Метод и результаты оптимизации на основе разработанной модели для определения рекомендуемых параметров судовой дизельной энергетической установки рассмотрены в работах [8], [9]. Расчет расхода топлива представлен на основе определения оптимального распределения нагрузки среди двигателей, связанного с обобщенной конкретной кривой расхода топлива каждого двигателя.

Результаты показывают, что модель может быть использована для получения данных для ожидаемых эксплуатационных (энергетических) затрат и поддержки принятия решений для выбора оптимальных параметров систем. Однако в рассмотренной ранее литературе наличие множества противоречивых требований, предъявляемых к СТС, приводит к тому, что результатом оптимизационного исследования является множество альтернативных оптимальных технических решений при многокритериальной, многопараметрической оптимизации. Кроме того, несмотря на полезность использования описанных подходов, в настоящее время имеются трудности применения методов оптимизации, а также решения практических задач многокритериальной, многопараметрической оптимизации технологических параметров эксплуатируемых судовых СТС. К ним можно отнести большую размерность задач (десятки и сотни переменных и ограничений), топологическую сложность оптимизируемой функции, значительные вычислительные затраты, необходимость решения задачи в многокритериальной постановке, а также использования не связанных между собой моделей.

Таким образом, исходя из ранее изложенного, повышение эффективности эксплуатации судовых СТС на основе моделирования и многокритериальной, многопараметрической оптимизации технологических параметров эксплуатируемых судовых СТС при минимизации энергозатрат является актуальной задачей.

Решение задачи повышения эффективности эксплуатации судовых СТС

В целях повышения эффективности эксплуатации судовых СТС для решения поставленной задачи в качестве объекта исследования выбрана судовая энергетическая установка на базе дизельной энергетической установки (ДЭУ) DEUTZ TBD. При постановке задачи оптимизации характеристик подсистем ДЭУ в первую очередь необходимо разработать модели многокритериаль-

ной и многопараметрической оптимизации технологических параметров ДЭУ, для которой необходимо определить набор независимых параметров, а также условий, определяющих допустимые значения, принимаемые переменными. Следующим шагом является получение целевой функции как меры качества объекта оптимизации с заданными переменными. Третьим шагом является выбор метода и решение оптимизационной задачи.

Решение задачи оптимизации энергетических показателей ДЭУ опирается на системный подход. Качество работы ДЭУ характеризуется совокупностью показателей (критериев) качества, влияющих на энергоэффективность работы системы, основными из которых являются:

– долевые мощности главного двигателя (P_1), вспомогательного дизель-генератора (P_2), аварийного дизель-генератора (P_3), валогенератора (P_4);

– долевые часовые расходы топлива главным двигателем (B_1), вспомогательным дизель-генератором (B_2), аварийным дизель-генератором (B_3);

– долевой удельный расход топлива главным двигателем в ходовом режиме (b_1);

– число работающих в ходовом режиме главных двигателей (n_1), вспомогательных дизель-генераторов (n_2), аварийных дизель-генераторов (n_3), валогенераторов (n_4);

– низшая удельная теплота сгорания топлива, используемого: главным двигателем (Q_1), вспомогательным дизель-генератором (Q_2), аварийным дизель-генератором (Q_3), валогенератором (Q_4).

Совокупность показателей качества системы может быть записана в виде вектора

$$Э = \{P_k, B_k, b_1, n_k, Q_k\}.$$

Величина Э является энергозатратами, или обобщенным показателем качества ДЭУ, для которой критерием качества является целевая функция системы. Целевая функция параметрической оптимизации энергетических показателей ДЭУ с набором переменных, влияющих на эффективность работы системы и вектор переменных, выражены следующей функцией:

$$\Psi = \min \varphi\left(\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot P_i \cdot B_i \cdot Q_i + n_4 \cdot P_4 \cdot b_1 \cdot Q_4\right),$$

где $i = 1 \ldots k$, $k = 3$.

Варьируемые величины при расчете Ψ:

– долевая мощность главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора, валогенератора;

– долевой часовой расход топлива главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора;

– долевой удельный расход топлива главного двигателя в ходовом режиме.

Задача оптимизации заключается в обобщении минимальных энергозатрат ДЭУ при определенных состояниях ее показателей:

$$\Psi = \min \begin{cases} \varphi(P_1) = \min \varphi\left(P_{1_k}\right); \\ \varphi(P_2) = \min \varphi\left(P_{2_k}\right); \\ \varphi(P_3) = \min \varphi\left(P_{3_k}\right); \\ \varphi(P_4) = \min \varphi\left(P_{4_k}\right); \\ \varphi(B_1) = \min \varphi\left(B_{1_k}\right); \\ \varphi(B_2) = \min \varphi\left(B_{2_k}\right); \\ \varphi(B_3) = \min \varphi\left(B_{3_k}\right); \\ \varphi(b_1) = \min \varphi\left(b_{1_k}\right). \end{cases}$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности главного двигателя:

$$\varphi(P_1) = \min \varphi(P_{1_k});$$

$$P_1 = \left\{ P_{1_k} \in P_1 | P_{1_{\min i}} < P_1 < P_{1_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности вспомогательного дизель-генератора:

$$\varphi\left(P_2\right) = \min \varphi\left(P_{2_k}\right);$$

$$P_2 = \left\{ P_{2_k} \in P_2 | P_{2_{\min i}} < P_2 < P_{2_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности аварийного дизель-генератора:

$$\varphi\left(P_3\right) = \min \varphi\left(P_{3_k}\right);$$

$$P_3 = \left\{ P_{3_k} \in P_3 | P_{3_{\min i}} < P_3 < P_{3_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевой мощности валогенератора:

$$\varphi\left(P_4\right) = \min \varphi\left(P_{4_k}\right);$$

$$P_4 = \left\{ P_{4_k} \in P_4 | P_{4_{\min i}} < P_4 < P_{4_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива главным двигателем:

$$\varphi\left(B_1\right) = \min \varphi\left(B_{1_k}\right);$$

$$B_1 = \left\{ B_{1_k} \in B_1 | B_{1_{\min i}} < B_1 < B_{1_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива вспомогательным дизель-генератором:

$$\varphi\left(B_2\right) = \min \varphi\left(B_{2_k}\right);$$

$$B_2 = \left\{ B_{2_k} \in B_2 | B_{2_{\min i}} < B_2 < B_{2_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевого часового расхода топлива аварийным дизель-генератором:

$$\varphi\left(B_3\right) = \min \varphi\left(B_{3_k}\right);$$

$$B_3 = \left\{ B_{3_k} \in B_3 | B_{3_{\min i}} < B_3 < B_{3_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

Целевая функция оптимизации долевого удельного расхода топлива главным двигателем в ходовом режиме:

$$\varphi\left(b_1\right) = \min \varphi\left(b_{1_k}\right);$$

$$b_1 = \left\{ b_{1_k} \in b_1 | b_{1_{\min i}} < b_1 < b_{1_{\max i}}, \; i = \overline{1,k} \right\}.$$

В целях нахождения минимума целевой функции с приемлемой точностью осуществлено масштабирование ее показателей качества.

В табл. 1 и 2 приведены показатели качества оптимизируемой ДЭУ в ходовом режиме работы, а также их численные значения с учетом наложенных ограничений.

Таблица 1

Показатели качества ДЭУ

Название устройства	Количество, шт.	Мощность, кВт	Долевой часовой расход топлива, кг/с	Теплота сгорания топлива, кДж/кг	Долевой удельный расход топлива, кг/кВт·ч
Главный двигатель	1	3850,00	2,50	41200,00	0,02
Вспомогательный дизель-генератор	1 или 2	400,00	0,33	4200,00	–

Таблица 1
(*Окончание*)

Аварийный дизель-генератор	1	350,00	0,08	4200,00	–
Валогенератор	1	400,00	0,08	4200,00	–

Таблица 2

Диапазоны численных значений показателей качества ДЭУ

Показатель качества	Ограничения	
	min	max
P_1	20000	38500
P_2	2000	4000
P_3	1500	3500
P_4	2000	4000
B_1	15000	25000
B_2	2000	3300
B_3	500	830
b_1	500	830

Для исследования моделей многокритериальной и многопараметрической оптимизации энергетических показателей ДЭУ разработаны алгоритмы, реализуемые в свободно распространяемой программе IOSO 3.3 [10], базирующейся на технологии построения поверхности отклика. Программный комплекс IOSO предназначен для повышения эффективности СТС на основе многокритериальной и многопараметрической оптимизации их параметров с использование процедур самоорганизации. Платформа IOSO позволяет осуществлять интеграцию различных расчетных моделей через входные и выходные файлы моделей, которые могут быть в xml-формате или обычном текстовом виде. Для интеграции с известными пакетами инженерного анализа (ANSYS, NASTRAN, TaskFlow, Star-CD, FineDesign) используются модули автоматической интеграции (рис. 1).

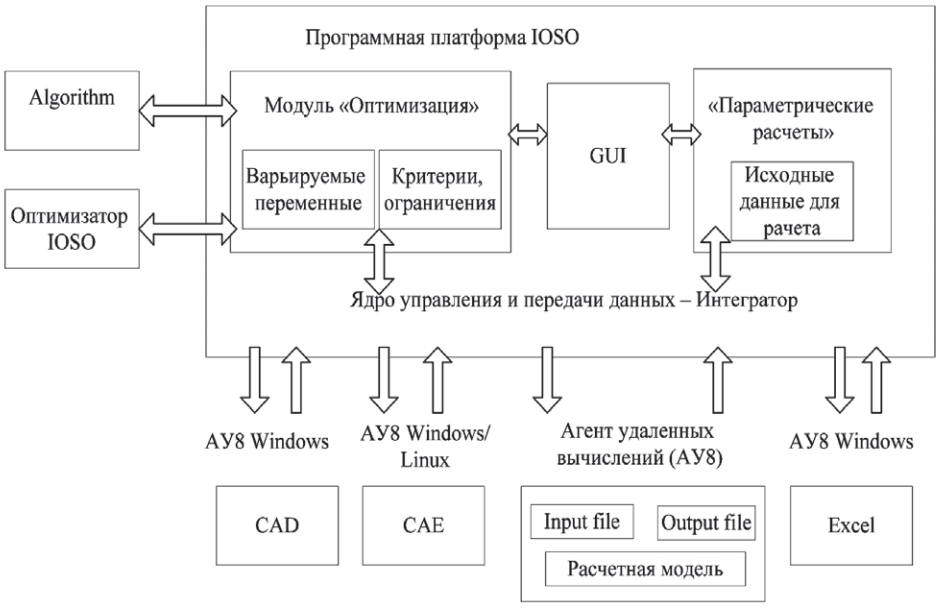


Рис. 1. Структура программной платформы управления расчетами и оптимизации IOSO

В платформе IOSO реализована возможность «парсинга» (разбора) значений во входных и выходных файлах моделей, обеспечивающая создание взаимосвязи моделей по параметрам, без использования дополнительных процедур трансфера и преобразования форматов. В результате решения задачи оптимизации определяется множество альтернативных решений, соответствующих принципу оптимальности Парето и удовлетворяющих поставленным ограничениям. Данная стратегия решения задач оптимизации существенно отличается от известных подходов нелинейного программирования, обладает более высокой эффективностью и обеспечивает существенно более широкие возможности. При настройке задачи оптимизации в IOSO осуществляется интеграция всех необходимых программных модулей в единый расчетный блок. На этом этапе задаются особенности запуска программных модулей, входные, выходные и передаваемые файлы, осуществляется настройка входных, выходных параметров, а также задание их диапазонов (рис. 2 и 3).

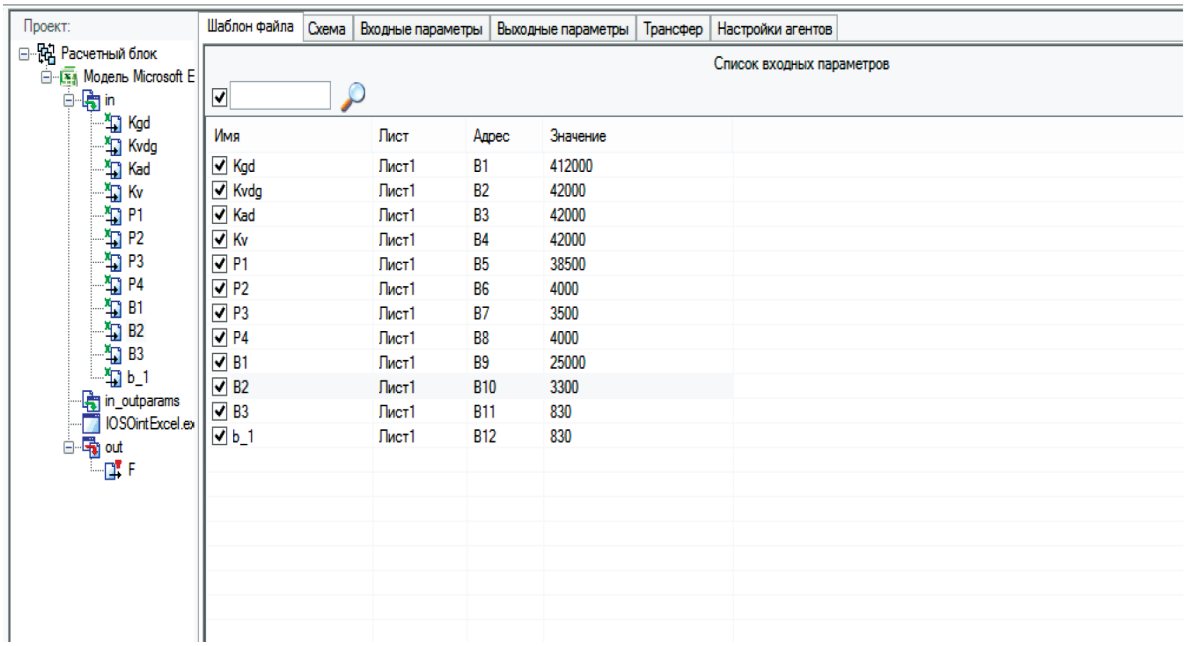


Рис. 2. Настройка входных и выходных параметров в IOSO

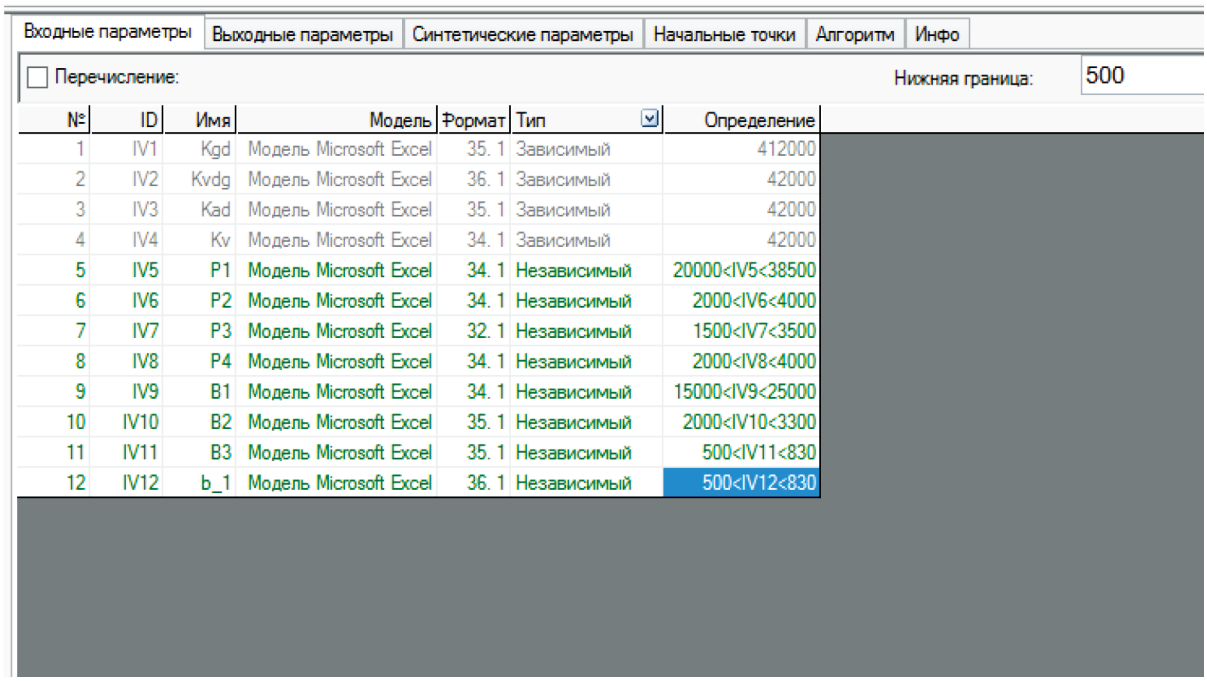


Рис. 3. Задание диапазонов ограничений входных параметров СТС

Результаты решения оптимизационной задачи

При проведении моделирования было выполнено 1020 итераций. На рис. 4 и 5 приведены некоторые Парето-оптимальные решения задачи многокритериальной и многопараметрической оптимизации определения рекомендуемых долевых мощностей главного двигателя (P_1) и вспомогательного дизель-генератора (P_2), при которых ДЭУ энергоэффективна.

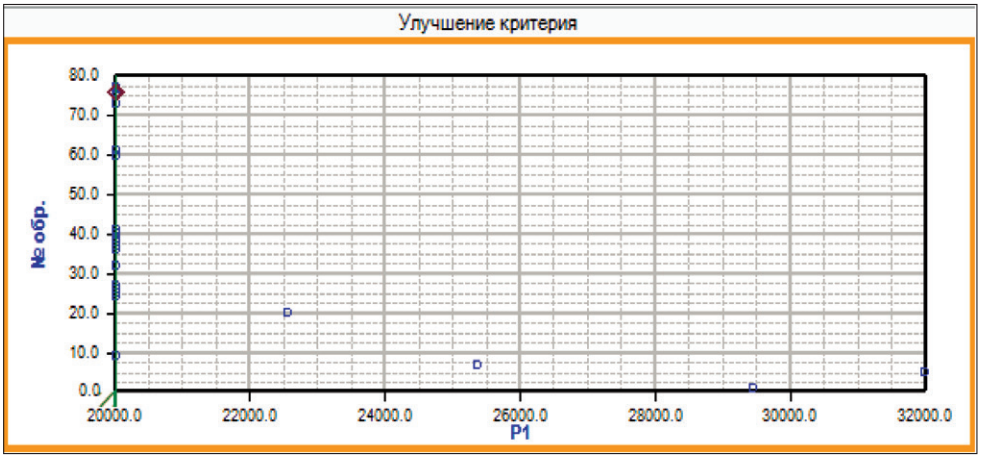


Рис. 4. Интерфейс параметрической оптимизации долевой мощности главного двигателя



Рис. 5. Интерфейс параметрической оптимизации долевой мощности вспомогательного дизель-генератора

На рис. 6 приведены Парето-оптимальные решения задачи оптимизации, определяющие множество альтернативных решений для ДЭУ в целом. В результате использования алгоритма оптимизации целевой функции в IOSO удалось получить оптимальные решения задачи повышения эффективности эксплуатации судовой СТС при минимизации энергозатрат.

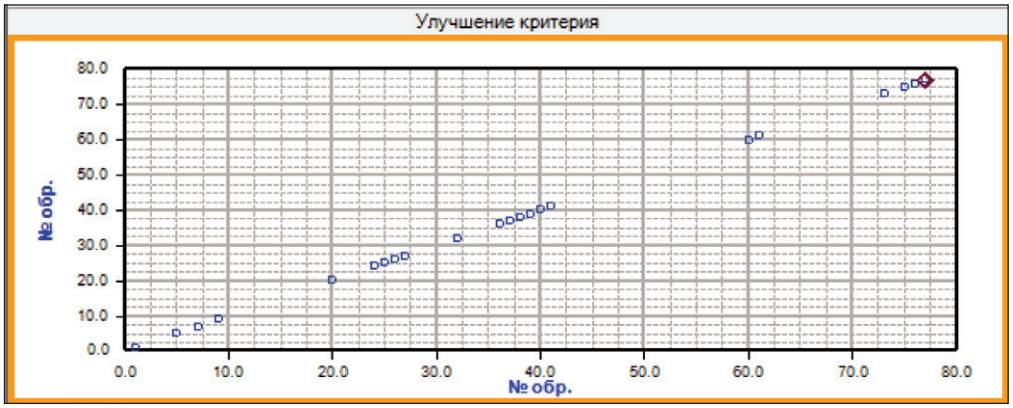


Рис. 6. Интерфейс параметрической оптимизации ДЭУ

Таким образом, полученные результаты исследований моделей оптимизации характеристик такой судовой СТС как ДЭУ позволяют установить конкретные значения долевых мощностей и долевых часовых расходов топлива главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора и валогенератора, а также долевой удельный расход топлива главным двигателем в ходовом режиме, при которых ДЭУ энергоэффективна.

Выводы

В целях повышения эффективности эксплуатации судовых СТС разработаны и исследованы модели многокритериальной и многопараметрической оптимизации технологических параметров ДЭУ для использования в концептуальной стадии эксплуатации судовых СТС в целях принятия решений по выбору технологических параметров главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора, валогенератора. Модели предназначены для минимизации энергозатрат при эксплуатации СТС. В энергозатратах учитываются долевые мощности и долевые часовые расходы топлива главного двигателя, вспомогательного дизель-генератора, аварийного дизель-генератора и валогенератора, а также долевой удельный расход топлива главного двигателя в ходовом режиме. При постановке и решении задачи оптимизации технологических параметров СТС определен набор независимых параметров, условий, определяющих допустимые их значения, получена целевая функция и выбран метод решения оптимизационной задачи на базе системного подхода. В результате решения задачи многокритериальной и многопараметрической оптимизации с помощью программного комплекса IOSO определено множество альтернативных энергоэффективных решений, соответствующих принципу оптимальности Парето и удовлетворяющих поставленным ограничениям. Модели многокритериальной и многопараметрической оптимизации технологических параметров судовых СТС могут быть использованы для предоставления информации об ожидаемых энергетических затратах. Выбранные критерии энергоэффективности важны для обслуживающего СТС персонала для принятия альтернативных решений в целях повышения эффективности эксплуатации судовых СТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Даниловский А. Г.* Оптимизация судового пропульсивного комплекса: монография / А. Г. Даниловский. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2008. — 173 с.

2. *Захаров Г. В.* Техническая эксплуатация судовых дизельных установок / Г. В. Захаров. — М.: Транспорт, 2009. — 256 с.

3. *Hatzilau I. K.* On electric load characterization and categorization in ship electric installations / I. K. Hatzilau, G. J. Tsekouras, J. M. Prousalidis, I. K. Gyparis // IEEE Transactions on Power Systems. — 2007. — No 3. — Pp. 1120–1128.

4. *Tsekouras G. J.* A new pattern recognition methodology for classification of load profiles for ships electric consumers / G. J. Tsekouras, I. K. Hatzilau, J. M. Prousalidis // Journal of Marine Engineering and Technology. — 2009. — Vol. 8. — Is. 2. — Pp. 45–58. DOI: 10.1080/20464177.2009.11020222.

5. *Radan D.* Optimization Of Load Dependent Start Tables in Marine Power Management Systems with Blackout Prevention / D. Radan, T. A. Johansen, A. J. Sørensen, A. K. Ådnanes // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. — 2005. — Vol. 4. — Is. 12. — Pp. 1861–1866.

6. *Jiang C.* Ship Hull and Machinery Optimization using Physics Based Design Software / C. Jiang, B. Forstell, D. Lavis, O. Ritter // Marine Technology. — 2002. — Vol. 39. — No. 2. — Pp. 109–117.

7. *Hansen J. F.* Modeling and Control of Marine Power Systems: Dr. diss. / J. F. Hansen. — Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2000. — 119 p.

8. *Solem S.* Optimization of diesel electric machinery system configuration in conceptual ship design / S. Solem, K. Fagerholt, S. O. Erikstad, Ø. Patricksson // Journal of Marine Science and Technology. — 2015. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 406–416. DOI: 10.1007/s00773-015-0307-4.

9. *Balland O.* Optimized selection of air emission controls for vessels / O. Balland, S. O. Erikstad, K. Fagerholt // Maritime Policy & Management. — 2012. — Vol. 39. — Is. 4. — Pp. 387–400. DOI: 10.1080/03088839.2012.689877.

10. Программа для ПЭВМ по оптимизации IOSO [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.aec-service.ru/articles/10.html (дата обращения – 24.12.2007).

IMPROVING EFFICIENCY OPERATION OF SHIP COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS BASED ON MODELING AND MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

The results of the analysis of the literature, which suggests the best options on the relevance of search quality criteria for taking the final decision in order to improve the efficiency of operation of ship complex technical systems. To achieve this goal are designed and studied models of multicriteria and multi-parameter optimization of process parameters of complex technical systems operated by the example of the ship's power plant. When formulating and solving the problem of optimizing the characteristics of the ship's power plant has a set of independent parameters, conditions determining the allowable values, obtained objective function and the selected method for solving the optimization problem based on a systems approach. As a result, the solution of the optimization problem defined by a set of alternative solutions that correspond to the principle of Pareto optimality and satisfies the constraints. These results allow us to optimize the value of equity to establish specific facilities and time fuel consumption main engine, auxiliary diesel generators, emergency diesel generator at which the ship's power plant energy efficiency.

Keywords: ship's propulsion system, multi-objective optimization, and energy efficiency.

REFERENCES

1. Danilovskij, A. G. *Optimizacija sudovogo propul'sivnogo kompleksa: monografija*. SPb.: SPbGMTU, 2008.

2. Zaharov, G. V. *Tehnicheskaja jekspluatacija sudovyh dizel'nyh ustanovok* Transport, 2009.

3. Hatzilau, I. K., G. J. Tsekouras, J. M. Prousalidis, and I. K. Gyparis. "On electric load characterization and categorization in ship electric installations." *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007. No 3. 1120–1128.

4. Tsekouras, G. J., I. K. Hatzilau, and J. M. Prousalidis. "A new pattern recognition methodology for classification of load profiles for ships electric consumers." *Journal of Marine Engineering and Technology* 8.2 (2009): 45–58. DOI: 10.1080/20464177.2009.11020222.

5. Radan, Damir, T. A. Johansen, A. J. Sørensen, and A. K. Ådnanes. "Optimization of load dependent start tables in marine power management systems with blackout prevention." *WSEAS Transactions on circuits and systems* 4.12 (2005): 1861–1866.

6. Jiang, Changben, B. Forstell, D. Lavis, and O. Ritter. "Ship hull and machinery optimization using physics-based design software." *Marine Technology* 39.2 (2002): 109–117.

7. Hansen, Jan Fredrik. Modeling and control of marine power systems. Doctor thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2000.

8. Solem, Siri, Kjetil Fagerholt, Stein Ove Erikstad, and Øyvind Patricksson. "Optimization of diesel electric machinery system configuration in conceptual ship design." *Journal of Marine Science and Technology* 20.3 (2015): 406–416. DOI: 10.1007/s00773-015-0307-4.

9. Balland, Océane, Stein Ove Erikstad, and Kjetil Fagerholt. "Optimized selection of air emission controls for vessels." *Maritime Policy & Management* 39.4 (2012): 387–400. DOI: 10.1080/03088839.2012.689877

10. Programma dlja PJeVM po optimizacii IOSO. Web. 24 Dec. 2007 <http://www.aec-service.ru/articles/10.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вычужанин Владимир Викторович —
доктор технических наук, профессор.
Одесский национальный морской университет
vint532@yandex.ru
Шибаева Наталья Олеговна — аспирант
Научный руководитель:
Вычужанин Владимир Викторович.
Одесский национальный морской университет
nati1986@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vychuzhanin Vladimir Viktorovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Odessa National Maritime University
vint532@yandex.ru
Shibaeva Natalia Olegovna — postgraduate.
Supervisor:
Vychuzhanin Vladimir Viktorovich.
Odessa National Maritime University
nati1986@bk.ru

Статья поступила в редакцию 13 июня 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-232-240
УДК 004.05

Ю. К. Полугина,
С. С. Соколов,
В. Д. Гаскаров

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ МЕТРИКИ МАРШРУТИЗАЦИИ В IP-ТЕЛЕФОНИИ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Внедрение современных технологий в производственный процесс является залогом повышения качества и эффективности. Внедрение IP-телефонии — не исключение. Связь является ключевым фактором нормальной работы любого транспортно-логистического центра. Специфика морского и речного транспорта предполагает значительную разрозненность отделений одной и той же компании при условии постоянного поддержания связи. Расширение географии деятельности компании в новых портах подразумевает оперативное развертывание и подключение к единой системе связи новых сотрудников. Городская сеть общего пользования не обладает такой мобильностью. IP-телефония же более выгодна экономически, более проста технически, но как технология с пакетной коммутацией обладает ее недостатками в маршрутизации: задержками и потерями пакетов. В статье проанализированы основные современные протоколы маршрутизации — статические и динамические. Более подробно описаны динамические — RIP, OSFP, IGRP, EIGRP — как наиболее часто используемые в современных устройствах. Проведен сравнительный анализ, выявлены преимущества и недостатки их алгоритмов, приведена сводная таблица описанных протоколов. На основе проанализированных данных выявлены существующие проблемы сетевых протоколов, такие как невозможность учета неограниченного числа критериев и неочевидность влияния приоритетных критериев на выбор маршрута. Исходя из этого, предложена наиболее оптимальная реализация алгоритма передачи пакетов в сети с помощью усовершенствованной комбинированной метрики маршрута. Благодаря новому алгоритму администратор транспортно-логистического центра может интуитивно распределять влияние тех или иных критериев канала на выбор маршрута прохождения трафика через узел и одновременно учитывать любое количество критериев каналов для любого удаленного портового отделения. Наглядно представлена работа нового алгоритма сетевого протокола на графиках с увеличением нагрузки и с учетом приоритетных критериев.

Ключевые слова: VOIP-телефония, коммутация пакетов, протоколы маршрутизации, алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана–Форда.

Введение

Любое предприятие при организации своего производства стремится уменьшить свои затраты, повышая при этом качество обслуживания. Не составляют исключение и предприятия отрасли водного транспорта. Технологический процесс каждого такого предприятия состоит из рабочих процессов, которые представляют собой взаимодействие нескольких людей, часто удаленных друг от друга. Так, взаимодействие начинается с клиента, продолжается в логистическом центре, который взаимодействует с администрацией порта, откуда груз отправляется, и администрацией порта, куда груз прибывает, таможенными службами и т. д. Помимо этого, для крупной логистической компании необходимо наличие офисов в ключевых морских и речных узлах, которые также должны взаимодействовать [1]. Взаимодействие может осуществляться через электронную почту, систему мгновенных сообщений, веб-сервисы, но самым предпочтительным и быстрым является IP-телефония.

IP-телефония реализует решения, которые с помощью технологии телефонной сети общего пользования реализовать труднее либо дороже. Поэтому внедрение VOIP значительно упростит и удешевит совместную работу территориально распределенных офисов одной и той же логистической компании с портами [2]. Выбор именно IP-телефонии обуславливается множеством достоинств:

– экономия средств при подключении, расширении и модернизации;

– простота в обслуживании;

– удаленные офисы и порты одной и той же компании могут иметь внутренние номера для упрощения связи;

– возможность использовать программные телефоны повысит мобильность сотрудников;

– организация корпоративного взаимодействия путем передачи голоса, видео, мгновенных сообщений, факса, конференций с помощью IP-телефонии значительно упростит, удешевит и повысит качество взаимодействия распределенных логистических центров морской или речной компании [3].

Проблема современных сетей с коммутацией пакетов заключается в оптимизации алгоритма протоколов маршрутизации пакетов. Поскольку IP-телефония также является технологией с коммутацией пакетов, задача выбора лучшего алгоритма маршрутизации пакетов становится актуальной. К тому же IP-телефония как технология передачи медиаданных в реальном времени, голоса в частности, довольно чувствительна к задержкам и потерям пакетов [4], что требует еще более тщательного подхода к выбору протокола маршрутизации пакетов [5]. Именно поэтому не менее актуальным является предложение варианта модификация уже существующих протоколов под специфику VOIP, что может решить задачу повышения качества обслуживания. Исходя из этого, основная задача исследования — предложить новый алгоритм, охватывающий все характеристики каналов и предоставляющий при этом возможность самостоятельного распределения трафика администратором путем учета приоритетных критериев.

Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является модернизация существующего протокола маршрутизации путем внедрения и совершенствования комбинированной метрики маршрута в соответствии со спецификой трафика в VOIP.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ наиболее популярных протоколов передачи данных и выявить наиболее подходящие для VOIP.

2. Предложить пути улучшения этих проколов.

3. Провести численные расчеты примера и показать влияние многокритериальной метрики и приоритетных критериев в модифицированном протоколе на изменение пути прохождения трафика на заданном примере.

Анализ существующих протоколов маршрутизации

Для сравнительного анализа и последующего предложения путей оптимизации маршрутизации трафика в IP-сетях рассмотрим табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица протоколов маршрутизации

	RIP	OSPF	IGRP	EIGRP
Тип алгоритма	Вектор расстояния (Беллмана–Форда)	Состояния каналов связи (Дейкстры)	Вектор расстояния (Беллмана–Форда)	Комбинированный (Беллмана–Форда)
Распределение нагрузки	Нет возможности	Равное распределение по каналам со схожими начениями метрик	Распределение по приоритетным критериям в метриках	Распределение по приоритетным критериям в метриках
Максимальное количество маршрутизаторов в сети	15	65534	255	255

Таблица 1
(*Окончание*)

Учет нескольких характеристик канала в общей метрике маршрута	Одна характеристика	Три характеристики, для каждой своя таблица маршрутизации	Комбинированная метрика	Комбинированная метрика
Обновление маршрутной информации	Передается вся таблица	Передаются только изменения	Передается вся таблица	Передаются только изменения
Техническая доступность	Открытый, поддерживает большинство маршрутизаторов	Открытый, поддерживает большинство маршрутизаторов	Только на оборудовании *Cisco Systems*	Только на оборудовании *Cisco Systems*

Из табл. 1 видно, что протокол RIP подходит лишь для небольших, малозагруженных сетей. Протоколы IGRP и EIGRP обладают общим существенным недостатком — оба они реализованы лишь на оборудовании *Cisco*, что лишает его универсальности использования. К тому же, в их основе лежит алгоритм Беллмана–Форда, который допускает наличие ребер с отрицательным весом, что в случае маршрутизации может привести к возникновению петель и, как следствие, к потере пакетов [6].

Протокол OSPF обладает большим количеством достоинств по сравнению с прочими, но отсутствие учета полного спектра характеристик канала не позволяет признать его наиболее подходящим для использования в IP-телефонии.

Пути улучшения качества

Для нахождения маршрута необходимо адекватное отображение модели характеристик каналов связи. Сетевые сервисы накладывают различные требования на характеристики каналов связи. Так интерактивные сервисы (telnet, ssh, RDP) и сервисы реального времени крайне чувствительны к задержке распространения. Трафик, создаваемый этими видами сервиса, обычно невелик. Сервисы, предназначенные для передачи файлов (FTP, NCP, SMB, NFS, HTTP), практически нечувствительны к задержке распространения, но создают значительный сетевой трафик. Существуют сервисы (потоковое мультимедиа, X-Window), требующие минимальных задержек при значительной полосе пропускания [7]. К тому же, сети компаний обычно построены на оборудовании различных производителей, а не исключительно *Cisco Systems*. Таким образом, к настоящему времени существует необходимость в разработке динамического протокола маршрутизации с адекватным отображением разнородных характеристик каналов связи с учетом особенностей сетевых сервисов, учетом требований системного администратора и реализованный на любом оборудовании.

В качестве основы возьмем протокол маршрутизации OSFP. Изменим лишь алгоритм вычисления его метрик путем внедрения комбинированной метрики, учитывающей все характеристики канала, некоторые из них должны быть максимизированы, а другие — минимизированы. При решении задачи оптимизации по нескольким критериям обычно сталкиваются с тем, что невозможно оптимизировать все критерии данной системы одновременно. Это свойство так называемого *компромисса* означает, что невозможно улучшить значение одного критерия без ухудшения другого [8]. Решением является введение комбинированной метрики, учитывающей все характеристики канала, некоторые из которых должны быть максимизированы, а другие — минимизированы.

Приведем пример. Рассмотрим распределенную инфраструктуру транспортно-логистического центра, объекты которой размещены в узлах *A*, *B*, *C*, *D*, *E*. Основным центром является узел *A* (рис. 1).

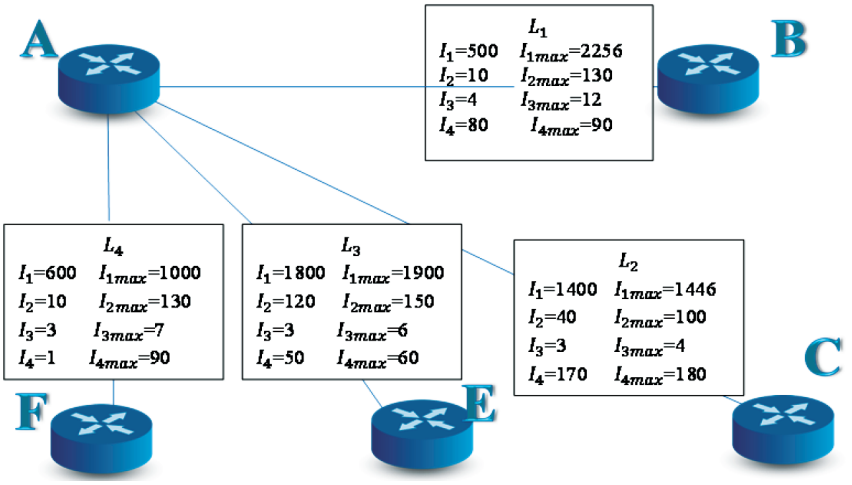


Рис. 1. Характеристики каналов узла *A*

Зададим критерии:

I_1 — скорость передачи данный по каналу (должна стремиться к максимуму);

I_2 — загруженность узла (должна стремиться к минимуму);

I_3 — время задержки (должно стремиться к минимуму);

I_4 — надежность (должна стремиться к максимуму).

Представим данные о значениях критериев, рассмотренные на рис. 1, в табличном виде (табл. 2).

Таблица 2

Значения критериев

	I_1	I_2	I_3	I_4
Для пути *AB*	500	10	4	80
Для пути *AC*	1400	40	3	170
Для пути *AE*	1800	120	3	50
Для пути *AF*	600	10	3	1

Поскольку для увеличения скорости и качества передачи данных некоторые критерии минимизируются, а другие — максимизируются, необходимо привести их к одному виду. А так как метрика предпочтительного пути должна быть минимальна, то минимизируем критерии I_1 и I_4 следующим образом:

$$I_{1\text{новый}} = I_{1\max} + I_{1\text{исходный}},$$

где $I_{1\max}$ — максимально-допустимое значение, которое задается техническими характеристиками канала. Для каждого порта оно может быть разным.

Результаты минимизации критериев представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты минимизации критериев

	I_1	I_2	I_3	I_4
Для пути *AB*	1756	10	4	10
Для пути *AC*	46	40	3	10
Для пути *AE*	100	120	3	10
Для пути *AF*	400	10	3	89

Задача многокритериальной оптимизации является некорректной, так как частные критерии качества конфликтуют между собой. Улучшение одного частного критерия качества ухудшает один или несколько других частных критериев. Регуляризацию некорректной задачи многокритериальной оптимизации выполним скалярной сверткой частных критериев качества по нелинейной схеме компромиссов [9]

$$L = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1 - \frac{I_i}{I_{i\max}}},$$

где I_i — частный критерий качества конкретного ребра графа; $I_{i\max}$ — максимально-допустимое значение, которое задается техническими характеристиками канала; L — вес дуги, n — количество частных критериев.

Тогда получим:

LAB := 8.2203333333333333

LAC := 7.7583473389355742297

LAE := 9.2555555555555555556

LAF := 94.500000000000000000

После вычисления многокритериальных метрик ребер вершин задача сводится к задаче о нахождении кратчайшего пути в графе, которая может быть решена по алгоритму Дейкстры. Тогда весь минимальный путь будет равен α_{I_4}, где I_4 — количество ребер на наикратчайшем пути. В данном случае это путь LAC := 7.7583473389355742297.

Довольно часто у администраторов сетей возникает такая потребность как перенаправление трафика по определенному критерию. Для учета приоритетов введем весовые коэффициенты для каждой частной характеристики канала — $\alpha_i \geq 0$, причем $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1 = 1$. Тогда вес ребра с учетом приоритетных коэффициентов будет равен

$$L = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1 - \frac{I_i}{I_{i\max}}},$$

а весь наикратчайший путь

$$\min L = \sum_{j=1}^{r} \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1 - \frac{I_i}{I_{i\max}}}.$$

Влияние приоритетных критериев на различные виды сервисов

VOIP. Для IP-телефонии не требуется большого объема трафика, так как кодируется только фактический разговор («тишина» не кодируется) и разбивается на пакеты небольшого объема. Задержка и надежность — определяющие критерии качества. При задержке пакетов они не соберутся в jitter-буфере в правильном порядке и информация будет искажена [10]. При значительных потерях пакетов есть вероятность вообще не разобрать речь собеседника.

Зададим соответствующие значения приоритетным критериям:

$$\alpha_{I_1} = 0,2;\ \alpha_{I_2} = 0,1;\ \alpha_{I_3} = 0,1;\ \alpha_{I_4} = 0,6.$$

Проведенный расчет значений весов с учетом значений приоритетных критериев представлен в табл. 4.

Таблица 4

Метрики путей из вершины *A*

Без учета критерия	С учетом критерия
LAB := 8.8953333333333333	LAB := 1.7790666666666667
LAC := 7.8995238095238095238	LAC := 0.78995238095238095238
LAE := 11.055555555555555556	LAE := 1.1055555555555555556
LAF := 5.5112359550561797753	LAF := 3.3067415730337078652

Характеристики канала *AC* стремятся к идеальным. Здесь и I_1 (скорость передачи данных), и I_4 (надежность) близки к максимальным, поэтому многокритериальная оценка дает лучший результат именно для сочетания характеристик пути *AC* (рис. 2 и 3).

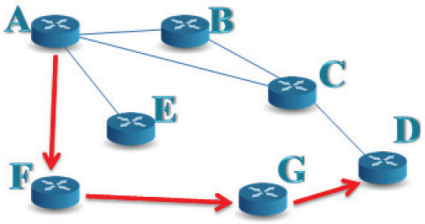


Рис. 2. Путь пакета при вычислении метрики без учета приоритетных критериев

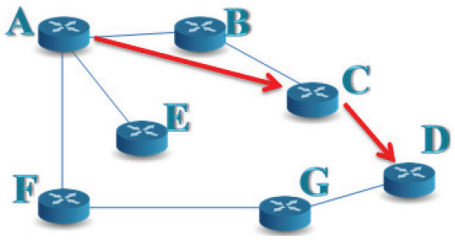
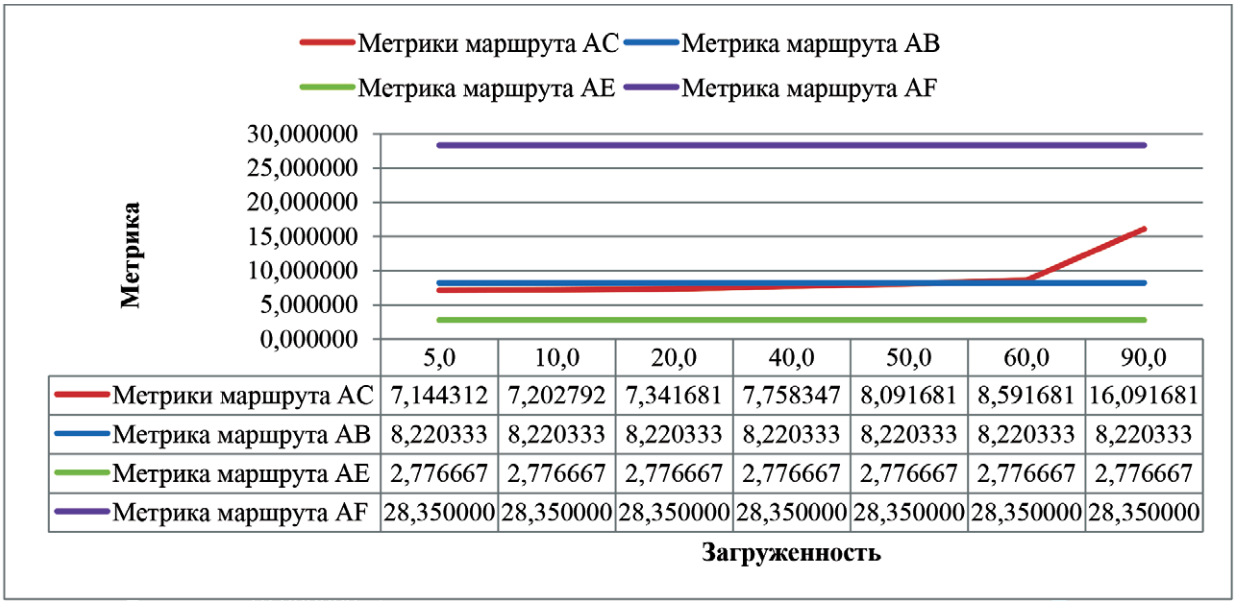


Рис. 3. Путь пакета при вычислении метрики с учетом приоритетных критериев

Обсуждение основных результатов

Комбинированная метрика наиболее точно описывает состояние каналов. Каждый критерий вносит, порой, существенное влияние на качество передачи данных. Предложенная формула вычисления метрики позволяет увеличить число определяющих критериев, что позволит оптимизировать маршрутизацию под имеющееся оборудование и существующие требования. Включение приоритетных критериев позволит системным администраторам достаточно просто и наглядно управлять перенаправлением трафика. Так, при возрастании нагрузки на канал поток может быть перенаправлен на другой путь.

Случай без использования приоритетных критериев. Данные характеристик каналов отображены на рис. 1. Случай, когда загруженность одного из каналов растет, загруженность прочих не меняется, проиллюстрирован на рис. 4.



	5,0	10,0	20,0	40,0	50,0	60,0	90,0
Метрики маршрута AC	7,144312	7,202792	7,341681	7,758347	8,091681	8,591681	16,091681
Метрика маршрута AB	8,220333	8,220333	8,220333	8,220333	8,220333	8,220333	8,220333
Метрика маршрута AE	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667
Метрика маршрута AF	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000

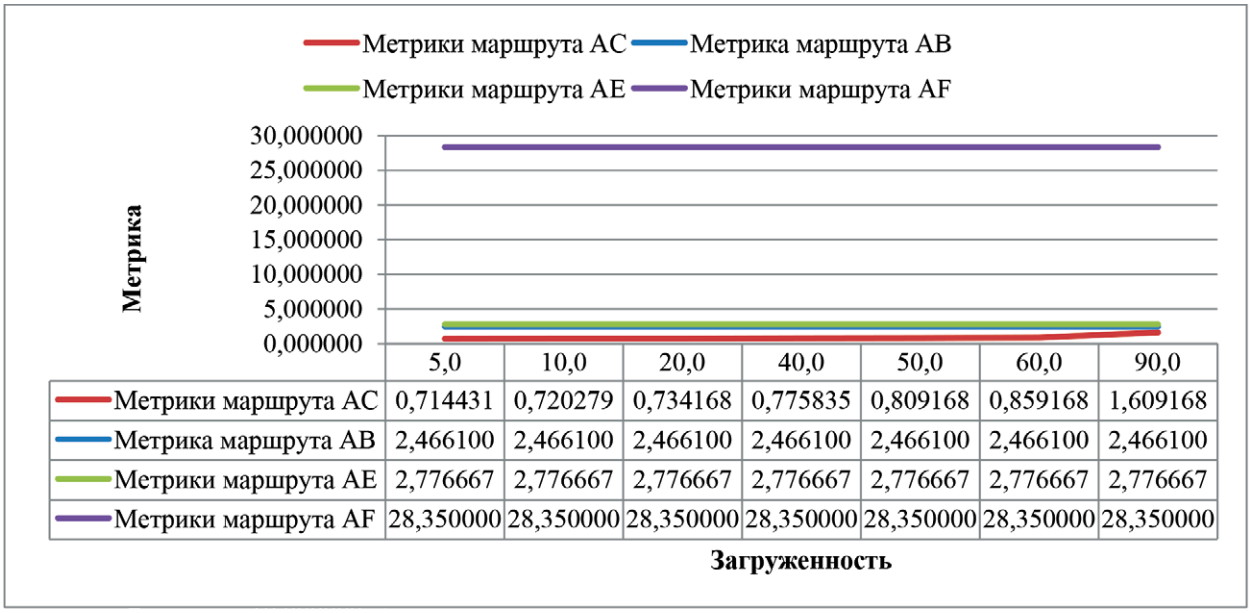
Рис. 4. Метрики каналов узла *A* без учета приоритетных критериев

Из рисунка видно, что наилучший маршрут *AC*, при возрастании на нем нагрузки, приобретает почти самую худшую метрику. Исходя из этого, трафик по этому каналу отправляться не будет, пока не снизится его загруженность.

Случай влияния приоритетных критериев.

$$\alpha_{I_1} = 0,3;\ \alpha_{I_2} = 0,1;\ \alpha_{I_3} = 0,3;\ \alpha_{I_4} = 0,3.$$

Поскольку для нас важен второй критерий — загруженность узла — и он должен быть минимальным, то его приоритетный критерий назначаем минимальным по сравнению с остальными. Тогда для тех же данных загруженности узлов получим следующее (рис. 5).



	5,0	10,0	20,0	40,0	50,0	60,0	90,0
Метрики маршрута AC	0,714431	0,720279	0,734168	0,775835	0,809168	0,859168	1,609168
Метрика маршрута AB	2,466100	2,466100	2,466100	2,466100	2,466100	2,466100	2,466100
Метрики маршрута AE	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667	2,776667
Метрики маршрута AF	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000	28,350000

Рис. 5. Метрики каналов узла *A* с учетом приоритетных критериев

Из рисунка видно, что из-за влияния приоритетного критерия метрика маршрута *AC* остается меньшей, чем все прочие метрики, даже при сильно загруженном канале.

Таким образом, представленная формула многокритериальной маршрутизации с приоритетными критериями является наиболее приемлемой для алгоритма маршрутизации в сети.

Выводы

1. Выбор конкретного протокола динамической маршрутизации зависит от размеров и требований, предъявляемых конкретной корпоративной сетью, от устанавливаемого оборудования и необходимости детального конфигурирования маршрутизации трафика системным администратором.

2. Поскольку для VOIP-сети до сих пор не существует специализированного протокола маршрутизации, приходится использовать существующие. На основе проведенного анализа выявлено, что на сегодняшний день наиболее подходящими внутренними протоколами динамической маршрутизации являются OSPF и EIGRP. Поэтому при организации VOIP в корпоративной сети транспортного логистического центра с взаимодействием с множеством клиентов и портов предпочтительно выбирать протокол EIGRP, если все маршрутизаторы представлены фирмой *Cisco* и квалификация обслуживающего персонала позволяет настроить маршрутизацию без появления петлей. Или использовать протокол OSPF как наиболее универсальный и обладающий достаточным количеством достоинств, но не полностью удовлетворяющий требованиям к качеству передаваемых медиа данных из-за наличия лишь однокритериальной метрики.

3. В результате проведенного исследования был предложен новый вариант алгоритма маршрутизации. В основе нового метода маршрутизации лежит алгоритм OSPF, так как он использует алгоритм Дейкстры, что позволяет избежать появления петель. Помимо этого, введена многокритериальная метрика с приоритетными критериями, что позволяет более эффективно управлять движением голосовых данных.

4. Алгоритм учета множества приоритетных критериев с интуитивно-понятным распределением их влияния представлен и рассмотрен на примере трафика VOIP. Представлен и на при-

мере проиллюстрирован механизм влияния критериев с учетом возрастающей нагрузки на канал. В этом случае администратор, управляющий всей телефонией, без особого труда выставит приоритеты для VOIP-трафика и, при необходимости, добавит в общую корпоративную сеть еще одну подсеть любого нового логистического удаленного центра, без появления лишней нагрузки служебной информацией на сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов С. С.* Основные аспекты автоматизации деятельности транспортных объектов / С. С. Соколов // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 5. — С. 83.

2. *Цветков В. Я.* Реализация IP-телефонии в территориально-распределенной компании / В. Я. Цветков, П. Г. Сырцев // Перспективы науки и образования. — 2015. — № 3 (15). — С. 40–47.

3. *Singh H. P.* VOIP: State of art for global connectivity — A critical review / H. P. Singh, S. Singh, J. Singh, S. A. Khan // Journal of Network and Computer Applications. — 2014. — Vol. 37. — Pp. 365–379. DOI:10.1016/j.jnca.2013.02.026.

4. *Дорофеев Р. С.* Оценка качества передачи голоса по IP-телефонии / Р. С. Дорофеев, А. С. Дорофеев // Тенденции инновационных процессов в науке: сб. ст. Международной научно-практической конференции (20 марта 2015 г., г. Москва). — М.: РИО ЕФИР, 2015. — С. 9–13.

5. *Дубровин В. С.* Корпоративная IP-телефония / В. С. Дубровин, О. И. Калташкина // Электроника и информационные технологии. — 2009. — № 2 (7). — С. 17.

6. *Листопад Н. И.* Модели оптимальной маршрутизации в компьютерных сетях / Н. И. Листопад, А. А. Матрук // Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика. — 2006. — № XVI. — С. 130–132.

7. *Ныркова А. П.* Мультисервисная сеть транспортной отрасли / А. П. Ныркова, С. С. Соколов, А. С. Белоусов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 4 (118). — С. 33–38.

8. *Листопад Н. И.* Методы балансировки трафика в IP сетях / Н. И. Листопад, И. О. Величкевич // Докл. БГУИР. — 2010. — № 7 (53). — С. 18–24.

9. *Воронин А. Н.* Декомпозиция и композиция свойств альтернатив в многокритериальных задачах принятия решений / А. Н. Воронин // Кибернетика и системный анализ. — 2009. — № 1. — С. 117–122.

10. *Гагарина Л. Г.* Повышение скорости передачи данных в пиринговых сетях для IP-телефонии / Л. Г. Гагарина // Радиопромышленность. — 2012. — № 3. — С. 177–184.

IMPROVE THE PERFORMANCE ROUTING PROTOCOLS IN IP TELEPHONY BY IMPROVING COMBINED METRICS ON THE EXAMPLE OF THE TRANSPORT AND LOGISTIC CENTER

The introduction of modern technologies in the production process is the key to improving quality and efficiency. The introduction of IP-telephony - is no exception. Communication is an important factor in the normal operation of any transport and logistics center. The specifics of sea and river transport involves considerable fragmentation of departments of the same company, provided a permanent liaison. Expanding the geography of the company's activities in the new port means rapid deployment and connection to a single communication system for new employees. Public Switched Telephone Network does not have such mobility. IP telephony is more profitable economically, technically more simple, but the technology is a packet-switched has its shortcomings in the routing: latency and packet loss. The article analyzes the main modern routing protocols — static and dynamic. A more detail described dynamic — RIP, OSFP, IGRP, EIGRP, as the most frequently used in modern devices. A comparative analysis revealed the advantages and disadvantages of the algorithms is a summary table described protocols. Based on the analyzed data, we identified problems of network protocols, such as inability to account unlimited number of criteria and non-obvious influence on the priority route selection criteria. Accordingly, it was offered the optimal implementation of the algorithm in the packet network using improved combined metric of the route. With the new algorithm, the administrator of transport and logistics center can intuitively distributing the impact of certain channel criteria to the choice of the route of the traffic through the node and at the same time to take into account any number of criteria channels for any remote port office. The work of the new algorithm of network protocol on graphs, with increasing load and taking into account the priority criteria is graphically presented.

Keywords: VOIP-telephony, packet switching, routing protocols, Dijkstra's algorithm, Ford & Bellman's algorithm.

REFERENCES

1. Sokolov, S. S. "The main aspects of work automatisation transport objects." *Modern problems of science and education* 5 (2013): 83.

2. Tsvetkov, V. Ya., and P. G. Syrtsev. "Implementation of IP-telephony in geographically distributed company." *Perspectives of Science and Education* 3(15) (2015): 40–47.

3. Singha, Harjit Pal, Sarabjeet Singha, J. Singhb, and S. A. Khanc. "VoIP: State of art for global connectivity—A critical review." *Journal of Network and Computer Applications* 37 (2014): 365–379. DOI:10.1016/j.jnca.2013.02.026.

4. Dorofeev, R. S., and A. S. Dorofeev. "Ocenka kachestva peredachi golosa po IP-telefonii." *Tendencii innovacionnyh processov v nauke: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (20 marta 2015 g, g. Moskva).* M.: RIO EFIR, 2015: 9–13.

5. Dubrovin, V. S., and O. I. Kaltashkina. "Korporativnaja IP-telefonija." *Jelektronika i informacionnye tehnologii* 2(7) (2009): 17.

6. Listopad, N. I. and A. A. Matruk. "Modeli optimalnoj marshrutizacii v kompjuternyh setjah." *Trudy BGTU. №6. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* XVI (2006): 130–132.

7. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. S. Belousov. "Multiservice network of transportation industry." *Herald of computer and information technologies* 4(118) (2014): 33–38.

8. Listopad, N. I., and I. O. Velichkevich. "Metody balansirovki trafika v IP setjah." *Dokl. BGUIR* 7(53) (2010): 18–24.

9. Voronin, A. N. "Dekompozicija i kompozicija svojstv alternativ v mnogokriterialnyh zadachah prinjatija reshenij." *Cybernetics and Systems Analysis* 1 (2009): 117–122.

10. Gagarina, L. G. "IP-telephony peer networks: increase of data transfer rate." *Radio industry* 3 (2012): 177–184.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Полугина Юлия Константиновна — аспирант. Научный руководитель: *Соколов Сергей Сергеевич*. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *u13-@mail.ru* *Соколов Сергей Сергеевич* — кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *sokolovss@gumrf.ru* *Гаскаров Вагиз Диляурович* — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» *u13-@mail.ru, kaf_koib@gumrf.ru*	*Polugina Julia Konstantinovna* — postgraduate. Supervisor: *Sokolov Sergey Sergeevich*. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *u13-@mail.ru* *Sokolov Sergey Sergeevich* — PhD, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *sokolovss@gumrf.ru* *Gaskarov Vagiz Dilyaurovich* — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *u13-@mail.ru, kaf_koib@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 12 мая 2016 г.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-241-248
УДК 626.4

В. С. Удалов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССОМ ШЛЮЗОВАНИЯ ДЛЯ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ СУДНА В КАМЕРЕ ШЛЮЗА И ПОДХОДНЫХ КАНАЛАХ

В статье рассмотрены существующие в настоящее время и нашедшие применение системы видеонаблюдения за процессом судопропуска. Дан обзор применения такого рода технологий в различных сферах деятельности человека, рассмотрены возможности применения систем видеонаблюдения и видеоаналитики в различных областях. Даны определения этих понятий и рассмотрены некоторые из их трактовок. Выполнен обзор текущей ситуации на объектах водного транспорта и выявлено, что существующие информационно-аналитические системы, использующиеся на шлюзах, не полностью реализуют свои функциональные возможности. Рассмотрена возможность того, что нагрузка на персонал при пропуске судов через судоходные шлюзы будет снижена за счет применения средств системы видеонаблюдения. Рассмотрена возможность интеграции средств анализа данных видеоряда в автоматизированные системы управления технологическим процессом судопропуска для обеспечения автоматизированного контроля положения судов при шлюзовании. Предложен способ определения местоположения судов в шлюзовой камере и подходных каналах посредством систем видеонаблюдения за процессом судопропуска. Предложен также вариант использования подсистемы видеоаналитики в качестве средства контроля стоповых линий и предупреждения возникновения аварийных ситуаций. Рассмотрен вариант пропуска судов в попутном направлении при использовании в качестве средства контроля положения судна камер наблюдения за процессом шлюзования со встроенной подсистемой определения движения и контроля движения в зоне наблюдения этих камер.

Ключевые слова: система видеонаблюдения, видеоаналитика, процесс шлюзования, средство позиционирования.

Введение

Современные шлюзы оборудованы множеством систем, облегчающих задачу шлюзования. Всевозможные датчики положения механизмов, датчики уровней воды, системы видеонаблюдения призваны увеличить контроль за процессом шлюзования как с технической точки зрения, так и с точки зрения управления процессом. Тем не менее, многие системы имеют потенциал, который в настоящее время не используется (например, подсистема аналитики видеоданных, получаемых от системы видеонаблюдения). Сейчас видеонаблюдение выполняет лишь вспомогательную функцию, позволяющую начальнику вахты контролировать правильность «створения» ворот шлюза, состояние судна в камере и на подходах к ней и т. п. Современные методы обработки информации позволяют снять выполнение этой задачи с человека, предоставив контроль автоматике, переложив также на вычислительные комплексы расстановку судов в камере шлюза и управление шлюзованием. В статье [1] рассматривается развитие систем видеонаблюдения и области их применения. Как видно из ранее изложенного, технологии не стоят на месте и развиваются, но даже те усовершенствования, которые в настоящее время применяются на объектах водного транспорта, не реализуют всех имеющихся возможностей.

Системы видеонаблюдения за процессом шлюзования в общем случае представляют собой комплекс устройств, позволяющих оператору наблюдать за ключевыми участками водного пути, задействованными в процессе шлюзования (как правило, это подходные каналы шлюза верхний и нижний, створ ворот, и камера шлюза). Таким образом, в системе используется шесть видеокамер высокой четкости с режимами работы «день / ночь» и видеорегистратор, куда стекаются данные с камер видеосистемы и монитор, на котором оператор может наблюдать за процессом шлюзования. Количество камер может варьироваться в зависимости от габаритов судоходного шлюза и технической необходимости наблюдения за иными механическими устройствами или руслом реки помимо ранее указанных.

Кроме функции непосредственного наблюдения за процессом шлюзования по требованиям транспортной безопасности, система видеонаблюдения должна обладать возможностью архивирования и воспроизведения данных из архива в течение минимум двух недель. Это необходимо в случае возникновения нештатных ситуаций, которые могут произойти в процессе шлюзования по вине кого-либо из участников процесса или в результате сбоев оборудования. Так, просматривая архив, можно выявить причины возникновения таких ситуаций и определить виновных. Руководство канала или района судоходства также имеет возможность просматривать данные с камер видеонаблюдения, например, для контроля прохождения того или иного судна через камеру шлюза. Данными функциями ограничивается использование такой мощной системы с гораздо более широкими возможностями.

Системы видеонаблюдения и видеоаналитики нашли свое применение в различных областях деятельности [1] – [4]. В работах [3], [4] такого рода системы и программно-аппаратные комплексы применяются в аграрной промышленности для обеспечения контроля за большими площадями с использованием автоматических средств. Авторы работ [2], [5], [6] описывают использование таких технологий в целях обеспечения безопасности и охраны правопорядка. Однако все они сходятся во мнении о том, что системы видеонаблюдения позволяют расширить и облегчить задачи контроля и наблюдения за отдельными участками деятельности. В то же время основным назначением систем видеонаблюдения подавляющее большинство считает обеспечение безопасности и видит их применение лишь в качестве «машинного зрения» для предотвращения или фиксации нарушений безопасности объекта.

В данной статье рассмотрено использование видеокамер наблюдения за процессом судопропуска и сервисов видеоаналитики не как средства обеспечения транспортной безопасности, а как способ контроля положения судов при шлюзовании наряду с автоматизированными идентификационными системами и системами позиционирования, такими как ГЛОНАСС и GPS.

Подсистема аналитики данных видеоряда

Видеоаналитика (video analytics) — аппаратно-программное обеспечение или технология, использующие методы компьютерного зрения для автоматизированного сбора данных на основе анализа потокового видео (видеоанализа), опирающееся на алгоритмы обработки изображения и распознавания образов, позволяющие анализировать видео без прямого участия человека. Видеоаналитика используется в составе интеллектуальных систем видеонаблюдения (CCTV и охранного телевидения), управления бизнесом (business intelligence, BI), а также видеопоиска.

На сегодняшний день термин «видеоаналитика» трактуется по-разному. Так, авторы статьи [7] считают, что большинство запросов на эту тему в интернете вообще не относится к проблеме анализа данных видеоряда. Степень проникновения видеоаналитики (машинного зрения) в области российского видеонаблюдения и в целом по миру крайне мала. Тем не менее, большинство специалистов в этой области сходятся во мнении, что через пять лет сфера охранного видеонаблюдения подвергнется серьезной модификации.

Средства видеоаналитики позволяют обнаруживать в видеокадре статические объекты довольно малого размера (пакеты, коробки и т. п.), фиксировать траекторию движения объекта и даже отслеживать его перемещение от одной камеры к другой [8]. Большинство современных систем видеонаблюдения обладают большими возможностями в плане аналитики событий, попадающих в поле зрения камер видеонаблюдения. В частности, в охранных системах применяется подсистема распознавания лиц или «слежки» за видимым объектом, а кроме того, многие системы могут отслеживать оставленные предметы на просматриваемой территории. В большинстве случаев возможности системы видеонаблюдения ограничиваются используемыми программными продуктами. Конечно, подобного рода системы не идеальны и обладают рядом недостатков, что отражено в публикации [9]. Тем не менее, при использовании таких систем на шлюзах внутренних водных путей России эти недостатки не представляют суще-

ственной проблемы и не мешают внедрению данных технологий для использования их в качестве инструмента контроля движения судов и определения их положения посредством камер видеонаблюдения.

Существует множество алгоритмов определения положения объекта в видеокадре, так же, как и множество вариантов распознавания движения этого объекта. В работах [5], [10] – [12] предлагаются различные методы обнаружения и слежения за объектом с использованием средств систем видеонаблюдения. Однако существуют уже готовые системы и средства для выполнения заданных функций. Видеоаналитика обладает рядом базовых функций, таких как обнаружение объектов и слежение за ними, классификация объектов и их идентификация, а также распознавание ситуаций. Для работы шлюза наиболее важны только некоторые из них, например, *обнаружение объектов*, *идентификация объектов* и *распознавание ситуаций*. Эти три функции реализуются при использовании ситуационной видеоаналитики.

Ситуационная видеоаналитика (situation video analytics) позволяет не только обнаружить объект и проследить его движение, но и классифицировать поведение объекта на основе правил, заданных пользователем. Ситуационная видеоананалитика существенно снижает нагрузку на оператора, так как устраняет необходимость анализа всех объектов в поле зрения камеры, а значит, исключает влияние человеческого фактора на работу системы [13]. В случае возникновения тревожной ситуации видео с одной или нескольких камер автоматически отображается на мониторе службы безопасности, подается звуковой сигнал и действие оператора заносится в протокол.

Правила на основе сигнальной линии подразумевают задание линии, при пересечении которой в одном или обоих направлениях формируются следующие события:

– пересечение линии;

– парный проход (движение в хвосте);

– движение против потока.

Правила на основе сигнальной зоны предполагают задание на видео многоугольника произвольной формы, на границе и внутри которого возможны следующие события:

– вход в зону;

– выход из зоны;

– остановка;

– перемещение в определенном направлении.

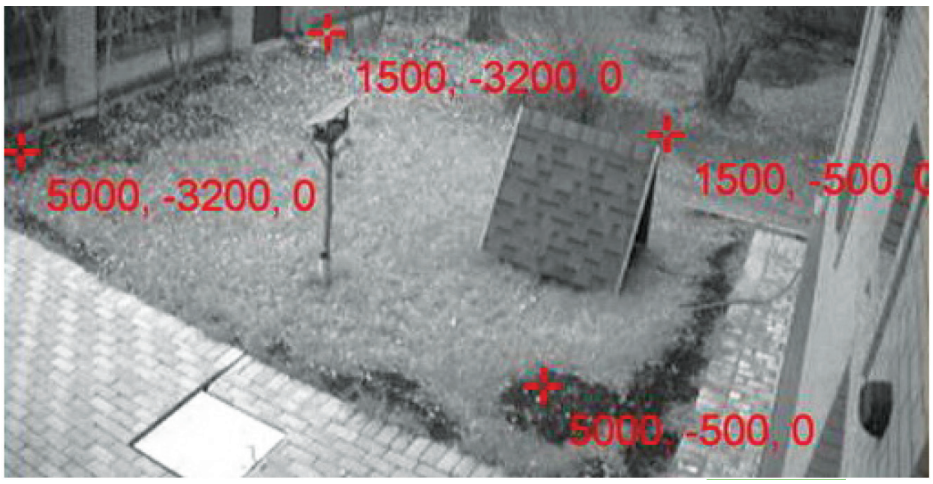
С помощью использования данной технологии система может автоматически отслеживать вхождение судна в подходной канал, приближение его к воротам камеры шлюза, вход в камеру шлюза и контролировать пересечение стоп-линий. Все это позволит снять с диспетчера шлюза часть нагрузки, связанной с контролем положения судна в камере шлюза и на подходах к ней. Кроме того, существенно снизится объем видеоданных, записываемых в архив.

Автор статьи [14], рассуждая на тему развития и перспектив систем видеонаблюдения, сервиса видеоаналитики, а также методов сжатия видеоданных, предполагает дальнейшее бурное развитие подобных технологий. В результате применения технологии адаптивного сжатия H.264 и H.265 избыточность данных видеоряда сокращается, что позволяет хранить большие объемы информации и с высокой эффективностью передавать их по сети. Применительно к системам видеонаблюдения за процессом судопропуска, актуальным является упомянутое в данной статье качество изображения. В условиях недостаточной видимости современные системы обеспечивают превосходное качество картинки благодаря средствам шумоподавления в сочетании с высокой светочувствительностью видеодатчиков камер. Последнее обстоятельство положительно сказывается на безопасности судопропуска, так как обеспечивает начальника вахты шлюза актуальной картиной событий, благодаря чему он может принять необходимые решения в процессе судопропуска и обеспечить его непрерывность и надежность.

Позиционирование судов в камере шлюза и в подходных каналах с использованием нескольких точек обзора

При пропуске судна через шлюзовую камеру необходимо отслеживать положение судна в ней. Диспетчер (начальник вахты) делает это при помощи наблюдения за изображением с камер видеонаблюдения. То же самое необходимо делать и при приближении судов к камере шлюза в подходных каналах с целью регулирования скорости приближения и направления движения судна. В основном эта задача возложена на судоводителя, тем не менее, начальник вахты шлюза также обязан контролировать момент приближения к шлюзовой камере.

Первоначально необходимо определить границы наблюдаемой зоны, сопоставить камеры с их полем зрения и участок наблюдаемой области. Далее путем наложения сетки для определения местоположения объекта на данные видеоряда с каждой отдельной камеры и сопоставляя эти данные с общей границей зоны наблюдения, можно проследить маршрут движения судна в подходном канале, в створе ворот и в камере шлюза. Перед началом эксплуатации системы производится привязка зоны наблюдения каждой камеры к карте контролируемой территории. Алгоритм калибровки использует четыре точки, координаты которых пользователь должен задать одновременно на кадре камеры и на карте.



Отметки для привязки объектов на кадре камеры

На рисунке показан пример сопряжения данных видеоряда и электронных карт и привязки координат к местности путем задания узловых точек. В данном случае использовано изображение с камеры видеонаблюдения жилого дома, но принцип работы алгоритма калибровки будет отражен аналогично и при использовании изображений с камер наружного видеонаблюдения судоходных шлюзов, как и при использовании изображения с камер системы наблюдения за процессом судопропуска. Рекомендуется использовать узловые точки на поверхности местности, которые легко определить визуально с различных ракурсов (например, деревья, углы дома и ограждений). Алгоритм калибровки вычисляет матрицу преобразования координат методом наименьших квадратов:

$$R = \boldsymbol{A} \cdot r;$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где r — координаты на кадре камеры; R — глобальные координаты на карте; $\boldsymbol{A}$ — искомая матрица преобразования.

Таким образом, матрица преобразования $\boldsymbol{A}$ позволяет отобразить двумерные координаты объекта в кадре камеры в его глобальные координаты на карте.

С помощью применения стандартных алгоритмов обработки видеоизображения, встроенных в программное обеспечение систем видеонаблюдения, можно получить достаточно достоверную информацию о положении судна и траектории его движения. Определив движение объекта на видеокадре и его следующее положение, можно рассчитать скорость его движения, а сопоставив точки на видеокадрах с глобальными координатами, можно получить траекторию движения.

Результатом работы «однокамерного» алгоритма сопровождения является последовательность пространственно-временных координат каждого объекта. При этом возможны разрывы траекторий при выходе объекта из поля зрения камеры или при заходе объекта за препятствие. Алгоритм «многокамерного» сопровождения позволяет непрерывно сопоставлять данные о положении объектов с различных камер с учетом взаимного расположения и привязке камер к карте местности, строить обобщенную траекторию объекта при движении от камеры к камере и проецировать эту траекторию на карту. В связи с тем, что в подходных каналах, как и в камере шлюза, нет никаких препятствий, которые затрудняют просчет координат и их прогнозирование при нахождении наблюдаемого объекта вне поля зрения камер, использование встроенных во многие программные комплексы видеонаблюдения алгоритмов трекинга позволит справиться с этой задачей. Таким образом, при наличии даже пяти камер наблюдения за процессом судопропуска (по одной в верхнем и нижнем подходных каналах, по одной на нижней и верхней головах шлюза и одной дополнительной камеры, расположенной примерно посередине камеры шлюза) можно построить систему местоопределения судов в подходных каналах и в камере шлюза для обеспечения автоматизации контроля пересечения судами стоповых линий, расстановки судов в камере шлюза и управлении его механизмами. Дополнительная камера, установленная посередине шлюзовой камеры, как раз и позволит обеспечить недостающую зону наблюдения, необходимую для контроля расстояния между судами, при шлюзовании более чем одного судна в одном направлении.

Пример работы процесса судопропуска при шлюзовании двух судов, следующих в попутном направлении

Первым этапом работы будет являться сигнал о вхождении объекта в зону наблюдения камеры, следящей за подходным каналом шлюза. Далее будет выполнен расчет траектории и скорости движения судна, основанный на изменениях координат движущегося объекта. Моментом вхождения судна в камеру шлюза будет момент появления его в поле видимости камеры, направленной на створ ворот камеры шлюза. Такие действия будут производиться с помощью алгоритма, реализующего одновременно контроль за расстояниями между двумя подвижными объектами и в то же время контролирующего прохождение «стоп-линий», ограничивающих полезные размеры камеры шлюза. На этом данный этап работы алгоритма будет завершен, суда в этот момент времени находятся в камере шлюза и готовы к шлюзованию.

Второй этап начинается после полной остановки движения судов в камере шлюза и их ошвартовки. Диспетчер (начальник вахты) дает подтверждение на шлюзование. После того как суда будут прошлюзованы, они должны выйти из шлюзовой камеры и здесь снова система видеонаблюдения будет работать аналогично тому, как она работала на первом этапе, только теперь она будет контролировать выход судов из зоны наблюдения. Таким образом, при шлюзовании двух судов в попутном направлении система видеонаблюдения сначала контролирует появление движущегося объекта, рассчитывает его скорость и траекторию, а затем контролирует положение судов в шлюзовой камере и разблокирует возможность автоматического продолжения шлюзования только после полной остановки судов в камере. На последнем (третьем) этапе система видеонаблюдения проконтролирует выход судов из камеры шлюза и даст возможность подготовить шлюз к повторному шлюзованию.

Выводы

1. Системы видеонаблюдения и видеоаналитики нашли свое применение в различных областях. Они применяются в аграрной промышленности, на транспорте (железнодорожном и автомобильном), для обеспечения охраны правопорядка. В настоящее время сферой основного их применения остается область обеспечения безопасности и охраны правопорядка.

2. Обзор и данные понятия «видеонаблюдение» и «видеоаналитика» позволили уяснить, что эти термины применяются достаточно широко и в различном контексте. Установлено, что нет единого мнения насчет точного их определения. Трактовка этих понятий в сильной степени зависит от контекста поиска и ожидаемых результатов.

3. Выявлено, что существующие информационно-аналитические системы, использующиеся на шлюзах, не полностью реализуют свои функциональные возможности. Развитие подсистем видеоаналитики позволит существенно снизить нагрузку как на персонал шлюза, так и на технические средства.

4. Интеграция сервисов анализа данных видеоряда в автоматизированные системы управления технологическим процессом судопропуска обеспечит автоматизированный контроль положения судна при шлюзовании, что отражено в рассмотренной в статье ситуации пропуска судов через судоходные шлюзы. Указан ряд проблем, связанных с характеристиками оборудования, и отмечается, что несмотря на это машинное зрение будет значительно эффективнее, чем работа диспетчера, особенно в темное время суток и в условиях недостаточной видимости в плане управления процессом шлюзования.

5. Предложенный способ определения местоположения судов в шлюзовой камере и подходных каналах посредством систем видеонаблюдения за процессом судопропуска позволяет контролировать процесс шлюзования в автоматическом режиме. Кроме того, использование подсистемы видеоаналитики в качестве средства контроля стоповых линий и предупреждения возникновения аварийных ситуаций дополнит или может вообще заменить существующие средства контроля. Вариант пропуска судов в попутном направлении при использовании в качестве средства контроля положения судна системы видеонаблюдения со встроенной подсистемой определения движения и контроля движения в зоне наблюдения камер слежения подтверждает, что применение подобных средств и сервисов имеет тенденции к развитию и широкому применению в автоматизированных системах управления процессом судопропуска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саенко О. В.* Современные системы видеонаблюдение: возможности и перспективы / О. В. Саенко // Автоматизация в промышленности. — 2010. — № 12. — С. 59–60.

2. *Крылов С. И.* Видеоаналитика в области обеспечения безопасности / С. И. Крылов, А. В. Годовых // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сб. тезисов докладов, 14 – 16 октября 2015 г., г. Томск. — Томск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. — С. 48.

3. *Башилов А. М.* Интеллектуальное видеонаблюдение в аграрном производстве / А. М. Башилов // Вестник НГИЭИ. — 2014. — № 2 (33). — С. 29–37.

4. *Башилов А. М.* Видеонаблюдение и навигация в системах точного земледелия / А. М. Башилов, В. А. Королёв // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. — 2009. — № 3. — С. 7–11.

5. *Адушкина А. С.* Автоматизированная система обнаружения движения на видео / А. С. Адушкина, М. А. Кудрина // Конференция информационные технологии и нанотехнологии: сб. тр. конф. Самара, 29 июня – 01 июля 2015 г. — Самара: Изд-во «Самарский научный центр РАН», 2015. — С. 348–352.

6. *Жукова П. Н.* Обеспечение безопасности на объектах транспортной инфраструктуры посредством использования систем видеонаблюдения и видеоаналитики / П. Н. Жукова, В. А. Насонова, А. Н. Прокопенко // Проблемы правоохранительной деятельности. — 2015. — № 4. — С. 91–96.

7. MagicBox [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://magicbox.agrg.ru/videoanalytics (дата обращения – 24.11.2014).

8. *Орлов С.* Видеоаналитика: задачи и решения / С. Орлов // Журнал сетевых решений LAN. — 2014. — № 6. — С. 24–29.

9. Видеоаналитика: мифы и реальность [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.osp.ru/cw/2008/22/5154305/ (дата обращения – 24.11.2014).

10. *Машинская П. Ю.* Установки оборудования видеонаблюдения по периметру транспортного узла и анализ потоков видеоданных / П. Ю. Машинская, П. И. Михайлов // Проблемы теоретической и прикладной математики: труды XXXIX Молодежной школы-конференции. — Екатеринбург: УрОРАН, 2008. — С. 374–377.

11. *Гулящева Л. Н.* Методы обнаружения движущихся объектов на видеоизображениях, получаемых с видеокамер ограниченной подвижности / Л. Н. Гулящева // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. — 2014. — № 1 (9). — С. 107–111.

12. *Токарев В. Л.* Построение системы видеоаналитики / В. Л. Токарев, Д. А. Абрамов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2013. — № 9-1. — С. 270–276.

13. СИНЕЗИС Видеоаналитика [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://synesis.ru/solutions/cepheus/situatsionnaia-analikita (дата обращения 24.11.2014).

14. *Стрельцов Д.* Революционные тенденции и технологии в области видеонаблюдения в 2015 году и далее / Д. Стрельцов // Журнал сетевых решений LAN. — 2015. — № 1. — С. 18–21.

USAGE CCTV SYSTEM FOR SHIPLOCKING PROCESS AS SHIP POSITIONAL TOOL IN WATERLOCK CELL AND ADJOINING CHANNELS

This article examines the current and the use of video surveillance systems for process locking. Review of applying such technologies in various spheres of human activity, the possibility of the use of video surveillance and video analytics in a variety of fields. Definitions of these concepts, and reviewed some of their overwhelming. A review of the current situation on water transport facilities and found that existing information-analytical system used on the gateways do not fully implement their functionality. The possibility that the strain on the staff at pass ships through shipping gateways will be reduced through the use of video surveillance systems. Possibility of integration of data analysis tools video in automated control systems of technological process of locking to ensure automated control of ship position locking. A method to determine the location of the vessels in the shiplock chamber and entrance channels by means of video surveillance systems for process locking. Also the option is offered to use the subsystem video analytics as a means of control stop lines and prevent emergency situations. The option of skipping the courts in passing direction when used as a means to control the position of the vessel surveillance cameras for process locking with built-in motion detection and control subsystem of traffic cameras in the surveillance zone was considered.

Keywords: CCTV, analytics, shiplocking process, positional tool.

REFERENCES

1. Saenko, O. “State-of-the-art video surveillance systems: capabilities and outlook.” *Automation in Industry* 12 (2010): 59–60.

2. Krylov, S. I., and A. V. Godovyh. “Videoanalitika v oblasti obespechenija bezopasnosti.” *VI Shkola-konferencija molodyh atomshhikov Sibiri: sbornik tezisov dokladov, 14-16 oktjabrja 2015 g., g. Tomsk*. Tomsk: Izd-vo STI NIJaU MIFI, 2015: 48.

3. Bashilov, Aleksey Mihaylovich. “Intelligent video control in agricultural production.” *Bulletin NGII* 2(33) (2014): 29–37.

4. Bashilov, A. M., and V. A. Koroljov. “Videonabljudenie i navigacija v sistemah tochnogo zemledelija.” *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatelnogo uchrezhdenija vysshego professionalnogo obrazovanija Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. VP Gorjachkina* 3 (2009): 7–11.

5. Adushkina, A. S., and M. A. Kudrina. “Avtomatizirovannaja sistema obnaruzhenija dvizhenija na video.” *Konferencija informacionnye tehnologii i nanotehnologii: Sbornik trudov konferencii, Samara, 29 ijunja-01 ijulja 2015 g.* Samara: Izd. Samarskij nauchnyj centr RAN, 2015: 348–352.

6. Zhukova, P. N., V. A. Nasonova, and A. N. Prokopenko. “The transport infrastructure safety by the use of video surveillance and video analytics.” *Problems of law-enforcement activity* 4 (2015): 91–96.

7. MagicBox. Web. 24 Nov. 2014 <http://magicbox.agrg.ru/videoanalytics>.

8. Orlov, S. "Videoanalitika: zadachi i reshenija." *Zhurnal setevyh reshenij LAN* 6 (2014): 24–29.

9. Videoanalitika: mify i realnost. Web. 24 Nov. 2014 <http://www.osp.ru/cw/2008/22/5154305/>.

10. Mashinskaja, P. Ju., and P. I. Mihajlov. "Ustanovki oborudovanija videonabljudenija po perimetru transportnogo uzla i analiz potokov videodannyh." *Problemy teoreticheskoj i prikladnoj matematiki: Trudy XXXIX Molodezhnoj shkoly-konferencii*. Ekaterinburg: UrORAN, 2008: 374–377.

11. Guljashheva, L. N. "Metody obnaruzhenija dvizhushhihsja obektov na videoizobrazhenijah, poluchaemyh s videokamer ogranichennoj podvizhnosti." *Sovremennye problemy proektirovanija, proizvodstva i jekspluatacii radiotehnicheskih sistem* 1(9) (2014): 107–111.

12. Tokarev, Vyacheslav Leonidovich, and Dmitry Alexandorovich Abramov. "Creation of system of video analytics." *Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki* 9-1 (2013): 270–276.

13. SINEZIS Videoanalitika. Web 24 Nov. 2014 <http://synesis.ru/solutions/cepheus/situatsionnaia-analikita>.

14. Strelcov, D. "Revoljucionnye tendencii i tehnologii v oblasti videonabljudenija v 2015 godu i dale." *Zhurnal setevyh reshenij LAN* 3 (2015): 18–21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Удалов Виктор Сергеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Гаскаров Вагиз Дилярович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
vootau@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Udalov Victor Sergeevich — postgraduate.
Supervisor:
Gaskarov Vagiz Dilyaurovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
vootau@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 июня 2016 г.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи подготавливаются в текстовом редакторе Micrsoft Word 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 выравниваем по правому краю. Ученая степень и ученое звание авторов (при наличии) набираются 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 200 – 250 слов на русск. яз., перевод на англ. яз., допускается расширенная аннотация на англ. яз. (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 возрастания, 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 Micrsoft 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 рукопись в редакцию, автор подтверждает тем самым свое согласие на ее публикацию 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 и согласования (при необходимости) различных вопросов с автором редакционная коллегия сообщает автору о принятии решения об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ. При отклонении материалов из-за нарушения требований, предъявляемых к оформлению, или ввиду того, что материалы не отвечают тематике журнала, тексты не публикуются и не возвращаются. Авторы статей несут полную ответственность за предоставленные материалы, в том числе за соблюдение правил их публикации 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 4 (38)

2016 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 24.08.16. Формат 60x90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 31,25. Тираж 500 экз. Заказ № 404/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7