

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

ВЕСТНИК

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

Выпуск 6 (40)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 6 (40). — 260 с.

ISSN 2309-5180

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

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

Статьи публикуются на русском и английском языках.

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

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

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

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

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

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



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

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Давыденко А. А., Китиков А. Н. Оценка комплексной потребности портоориентированного логистического кластера в причальных фронтах 7

Кузнецов А. Л., Галин А. В., Кириченко А. В. Синергетика как методологическая основа развития базовой инфраструктуры портоориентированной логистики 19

Ершов А. А., Петухов П. И. Рекомендации по спрямлению судна при аварии в ледовых условиях 34

Костылев И. И., Евдокимов Г. П. Развитие газозовов сжиженного природного газа для удовлетворения потребностей в нем мирового рынка. Российские проекты сжиженного природного газа 42

Царик Р. С., Акмайкин Д. А. Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метacentрическую высоту контейнеровоза 58

Майоров Н. Н., Фетисов В. А. Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования 70

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 81

Фирсов Ю. Г. Современная батиметрическая съемка Северного Ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике 81

Колосков Е. Н., Корнипаев Б. А. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах 96

Королев И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы 105

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 113

Белецкий Е. Н. Специфика расчета элементов валопроводов, выполненных из композиционных материалов, с учетом направления армирования и физико-механических характеристик модификаторов матрицы 113

Петров В. М., Буцаец А. А., Безпальчук С. Н. Исследование влияния лазерной упрочняющей технологии поверхности образцов из титанового сплава на работоспособность пары трения скольжения углепластик – титан 120

Васильев К. А. Моделирование системы кондиционирования воздуха на участках механической обработки композиционных материалов судостроительного производства 129

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 140

Ерофеев В. Л., Жуков В. А., Пряхин А. С. Неточность термодинамических определений и терминов — путь к вечному двигателю второго рода 140

Маницын В. В., Соболенко А. Н. Анализ повреждений рамовых подшипников двигателей 8NVD48A-2U на промысловых судах 150

Кулешов И. И., Ходаковский В. М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей 155

выпуск 6(40)
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:	
<i>О. К. Безюков,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Веселков,</i> д.т.н., проф.	
<i>П. А. Гарибин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Д. П. Голоскоков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д.т.н., проф.	
<i>О. Г. Каратаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. В. Кириченко,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. А. Колосов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Королева,</i> д.э.н., проф.	
<i>И. И. Костылев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Кузнецов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Лаврентьева,</i> д.э.н., проф.	
<i>А. Ю. Ластовцев,</i> к.т.н., проф.	
<i>В. А. Логиновский,</i> д.т.н., проф.	
<i>Г. В. Макаров,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Е. Марлей,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. М. Никитин,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. П. Нырков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Л. И. Погодаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. И. Решняк,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Романовский,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. А. Сикарев,</i> д.т.н., проф.	
<i>С. В. Смоленцев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Степанов,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. В. Сухотерин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. Г. Трунин,</i> к.э.н., директор РРР	
<i>В. И. Черненко,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Б. Чистов,</i> д.т.н., проф.	

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	169
<i>Саушев А. В., Бова Е. В., Гаспарян К. К. Метод контроля состояния электротехнических систем по измеряемым характеристикам в режиме тестового диагностирования</i>	169
<i>Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Мониторинг судов на трассах Северного морского пути с помощью спутниковых систем связи</i>	184
<i>Румянцев А. Ю., Самосейко В. Ф., Белоусова Н. В. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь</i>	206
<i>Рахматулин И. Р. Эффективность гелиосистем в электростанциях, работающих в местах дефицита энергии и на кораблях дальнего плавания</i>	214
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ	221
<i>Чертков А. А., Загрединов Д. А., Михайлов Ю. Б. Алгоритм наблюдателя системы управления курсом судна для оценки возмущений и шумов измерений</i>	221
<i>Макшанов А. В., Ли И. В. Решение задачи интеграции информации в распределенной морской системе наблюдения</i>	228
<i>Павлова Л. А., Соколов С. С. Использование полиномиальных моделей для моделирования процесса обработки рефрижераторных контейнерных грузов</i>	235
<i>Журавлев А. Е., Васильченко Д. С. Разработка и внедрение интегрируемой программно-аппаратной системы тренинга и аттестации на примере транспортного вуза</i>	242
<i>Печников Д. А. Разработка моделей и процедур интервальной оценки результатов контроля знаний в компьютерных системах тестирования ВМФ</i>	251

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Davydenko A. A., Kitikov A. N.</i> Assessment of the berth demands for the port-oriented logistic cluster	7
<i>Kuznetsov A. L., Galin A. V., Kirichenko A. V.</i> The synergy as the methodological approach for the basical infrastructure of port-oriented logistics	19
<i>Ershov A. A., Petuhov P. I.</i> Recommendations to straighten the ship in the accident in ice conditions	34
<i>Kostylev I. I., Evdokimov G. P.</i> The development of LNG liquefied natural gas to meet the demand of the world market. Russian projects of liquefied natural gas	42
<i>Tsarik R. S., Akmaykin D. A.</i> Evaluation of influence of container's center of gravity position on container ship's metacentric height	58
<i>Majorov N. N., Fetisov V. A.</i> Research of operational processes passenger services in the marine passenger terminal using simulation	70
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	81
<i>Firsov Yu. G.</i> Modern bathymetric survey in the Arctic ocean in the context of the extended continental shelf determination in Arctic	81
<i>Koloskov E. N., Kornipaev B. A.</i> Data backscatter seabed image in modern multibeam echo sounders	96
<i>Korolev I. Ju.</i> Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip	105
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	113
<i>Beleckij E. N.</i> The specifics of the calculation of the elements of shafts made of composite materials with respect to the direction of reinforcement and physico-mechanical characteristics of matrix modifiers	113
<i>Petrov V. M., Butsanets A. A., Bezpal'chuk S. N.</i> Influence of laser hardening technology of surface of samples of titanium alloy on the performance of friction pairs carbon fiber – titanium	120
<i>Vasilev K. A.</i> Simulation of air conditioning system in areas of machining of composite materials shipbuilding production	129
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	140
<i>Erofeyev V. L., Zhukov V. A., Pryakhin A. S.</i> Inexactitude of thermodynamical definitions and terms is a way to the perpetual engine of the second kind	140
<i>Manitsin V. V., Sobolenko A. N.</i> Analysis of bedplate bearings damages of 8NVD48A-2U engines on fishing vessels	150
<i>Kuleshov I. I., Khodakovskiy V. M.</i> Improving the operability of the piston's crowns rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine	155
ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS	169
<i>Saushev A. V., Bova E. V., Gasparjan K. K.</i> Method of condition monitoring of electrical systems measured characteristics of test diagnostics	169
<i>Marinich A. N., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M.</i> Monitoring of ships along the Northern Sea Route using satellite communication systems	184

edition **6(40)**
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, Prof.
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Sikarev,
doctor of technical Sciences, Prof.
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. V. 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.

Rumyantsev A. Yu., Samoseiko V. F., Belousova N. V. Optimal control
of the electric propulsion systems of vessels on the criterion of minimum losses 206
Rakhmatulin I. R. Efficiency of solar systems in power stations for working
in places deficit energy and ships deepwater 214

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 221

Chertkov A. A., Zagredinov D. A., Mihaylov Ju. B. Algorithm of ship course control
system watcher for assessing disturbances and noise measurements 221
Makshanov A. V., Li I. V. Solution of information integration problem for distributed
maritime observation system (DMOS) 228
Pavlova L. A., Sokolov S. S. Use polynomial models for modeling processing
of reefer container cargo 235
Zhuravlev A. E., Vasilchenko D. S. Integrated soft-hardware testing simulator
development and implementation on the transport university example 242
Pechnikov D. A. Development of models and procedures for interval estimation
of the results of control of knowledge in computer systems testing, navy 251

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-7-18
УДК 627.32

А. А. Давыденко,
А. Н. Китиков

ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ПОТРЕБНОСТИ ПОРТООРИЕНТИРОВАННОГО ЛОГИСТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА В ПРИЧАЛЬНЫХ ФРОНТАХ

На основе анализа общемировых тенденций к появлению портоориентированных логистических кластеров выявлено усиление роли морских грузовых фронтов, которые во многом определяют эффективность работы этих капиталоемких инфраструктурных объектов транспортной индустрии. Показано, что морские порты и грузовые терминалы служат местом столкновения интересов многих участников: от государственных органов и частных инвесторов до судовых агентов и экспедиторов. Установлено, что основным противоречием является конфликт интересов перевозчиков и портовых операторов портов: первые всегда хотят видеть порт бездействующим в ожидании прибытия их судов, а последние — иметь все причалы занятыми грузовой работой. Показано, что это противоречие для своего разрешения требует установления оптимального баланса основных характеристик системы обслуживания. Сформулирована задача расчета (оценки) пропускной способности комплексного причального фронта портоориентированного логистического кластера. Установлено противоречие между требованиями практики и существующими аналитическими методами расчета основных элементов портовой инфраструктуры, рекомендуемых к использованию нормами технологического проектирования портов. Раскрыты методические причины возникновения выявленного противоречия. Проанализированы методологические причины неприемлемости расчетов, основанных на теории массового обслуживания, к идентифицированной предметной области. Предложены методы оценки потребности портоориентированного логистического кластера в причальных фронтах, основанные на имитационном моделировании комплекса неоднородных причалов. Неоднородность причалов допускается как по виду груза и типам судов, составляющих совокупный грузопоток портоориентированного логистического кластера, так и по ограничениям в их обработке на различных причалах, возникающих вследствие коммерческих ограничений. Приведены результаты экспериментов, доказывающих адекватность и результативность предлагаемой методики для оценки комплексной потребности портоориентированного логистического кластера в причальных фронтах.

Ключевые слова: логистические кластеры, методы расчета морского порта, теория массового обслуживания, имитационное моделирование.

Введение

В современном интернациональном транспортном бизнесе наблюдается явная тенденция к формированию портоориентированных логистических кластеров [1] – [4]. Наблюдаемое повсеместно возникновение вокруг эффективно работающих морских портов промышленно-индустриальных центров, промышленных зон, технологических и логистических комплексов, явление регионализации не обходит и отечественную транспортную индустрию [5]. Морские порты и грузовые терминалы, которые всегда служили местом столкновения интересов многих участников: от государственных органов и частных инвесторов до судовых агентов и экспедиторов, превращаются в еще более крупные арены борьбы множества заинтересованных сторон. Наиболее изученным является противоречие между перевозчиками и операторами портов: первые всегда хотят видеть порт бездействующим в ожидании прибытия их судов, а последние — иметь все причалы занятыми грузовой работой [6].

Общепризнанные объективные критерии оптимального баланса между количеством причалов и коммерческими характеристиками обслуживания флота отсутствуют, поскольку решение в значительной мере определяется коммерческой средой ведения бизнеса и выбранными компани-

ями логистическими стратегиями. Классические математические методы, которые лежат в основе известных процедур оптимизации, в основном опираются на явно или неявно сформулированные положения теории массового обслуживания (ТМО). Подавляющее большинство рекомендуемых к использованию методов расчета ключевых инфраструктурных параметров построено на основе жестких требований к характеристикам потоков заявок и каналов обслуживания. Многочисленные попытки модернизировать данный инструментарий с целью ухода от этих ограничений приводят к потере универсальности, общности и наглядности.

В основе методов ТМО лежит представление о рассматриваемом объекте как о системе массового обслуживания (СМО), образованной n однородными каналами (в данном случае причалами), принимающей поток заявок, т. е. прибывающими для обслуживания судами. Заявки, поступившие во время занятости всех каналов, помещаются в очередь, длина которой может ограничиваться некоторым значением m_s или предельным временем ожидания.

С целью получения расчетных соотношений поток заявок в большинстве случаев считается простейшим (стационарным, не имеющим последствия, т. е. ординарным). Эти допущения дают важные с практической точки зрения формулы, но одновременно служат существенными ограничениями для применимости методов. Природа случайного потока морских судов в большинстве практических случаев приводит к нарушению требуемых условий применимости. В лучшем случае это приводит к потере точности получаемых результатов, в худшем — к полной потере адекватности традиционных аналитических методов. Случайный поток морского транспорта практически никогда не является стационарным, так как коммерческие условия работы морских портов и сопряженных объектов цепи поставок, выражающихся в наличии своих расписаний движения смежного транспорта, дисциплины работы подходов каналов, а также режимами работы внешних складов, практикой работы органов контроля, действиями городских властей и др., вносят значимые неравномерности поступления транспорта. Они могут носить *сезонный* (поставки продуктов, действующие квоты и др.), *месячный* (предрождественская торговля), *суточный* (всплески потока в конце и начале недели), *сменный* (дневная прямая развозка в пункты торговли) и *часовой* (начало и конец рабочего дня) характер.

Суперпозиция всех указанных факторов способствует тому, что флуктуация поступления заявок от предполагаемого среднего значения может иметь амплитуду, измеряемую не в процентах, а в размах. Как правило, неясно, на какую интенсивность поступления следует полагаться при расчете характеристик — среднюю, которая может никогда не встречаться (большинство значений будут ниже средних величин как компенсация пиковых всплесков), или максимальную, которая будет регистрироваться лишь в короткие интервалы времени. В первом варианте пиковые всплески будут приводить к образованию очередей, поскольку спланированной мощности будет недостаточно, во втором — расчетное число каналов обслуживания (и связанные с ними капитальные вложения) большей частью времени будет простаивать.

Соответствующая научная задача формулируется следующим образом. Целью расчета является определение числа каналов обслуживания. Задаваемыми и варьируемыми внешними величинами являются интенсивность потока поступления и время обслуживания. В проектной задаче следует указать, какой критерий должен быть использован для каждого частного грузопотока, какие ограничения являются жесткими, а какие могут быть временно сняты и т. д.

В случае отсутствия в сформированных представлениях об ожидаемом характере грузопотока жесткости условий и величины потерь, связанных с избытком или дефицитом размещаемых ресурсов, следует выполнить расчет для спектра полярных вариантов. Поскольку результаты ТМО получены для однородных каналов обслуживания и простейших потоков поступающих заявок, то, соответственно, чем больше отклонения от них, тем менее точными являются конечные результаты. Кроме того, причал как инфраструктурный элемент обычно тождественен причалу как административно-учетной единице. Впоследствии при этом оказывается невозможным использование традиционного коэффициента занятости причала, т. е. канала обслуживания. Причиной этого является быстрый рост размеров судов, который требует строительства причалов большей

длины. Сохранение в эксплуатации судов меньшего размера приводит к появлению значительной неоднородности состава судов, обслуживаемых в большинстве современных морских портов.

Одновременное использование новых причалов для обработки судов разного размера стало приводить к значительной неоднозначности в интерпретации коэффициента занятости, определенного традиционным способом. Действительно, если на таком причале одновременно обрабатывается два или более судна, то время их стоянки при расчете занятости причала складывается. В ряде случаев коэффициент использования увеличивается настолько, что его значение превышает 100 %. С другой стороны, обслуживаемое на длинном причале малое судно по времени может давать приемлемое значение использования, но это касается лишь части длины причальной стенки, т. е. оцениваемого ресурса. В качестве способа устранения этого противоречия операторы и проектировщики терминалов сначала пытались использовать некоторые условные модули, в единицах которых исчисляли причальные фронты [7]. Во второй половине XX в. таким условным модулем для контейнерных терминалов считался линейный участок причала длиной 200 м. Дальнейшее развитие флота и терминалов привело к последовательному увеличению этого модуля (вначале до 250 м, затем до 300 м и далее), что, в конце концов, показало бесперспективность этого подхода. Все эти обстоятельства заставляют искать иные методы оценки объема склада в зависимости от характера неравномерности поступления партий, новые определения и способы оценки занятости причалов в морских портах.

Краткая характеристика методов теории массового обслуживания

Поток заявок характеризуется величиной средней *плотности потока поступления* заявок λ , определяемой как количество заявок в единицу времени. Таким образом, плотность потока заявок есть отношение числа поступивших заявок N к рассматриваемому периоду времени T , т. е. является величиной, обратной среднему *интервалу времени* между заявками:

$$\lambda = \frac{N}{T} = \frac{1}{T_{\text{инт}}} . \quad (1)$$

Каналы обслуживания характеризуются средней *длительностью обслуживания* $T_{\text{обс}}$, для простоты выводов считающейся распределенной по показательному закону. Аналогично потоку поступающих в систему заявок покидающие систему обслуженные заявки характеризуются величиной, обратной длительности обслуживания: $\mu = \frac{1}{T_{\text{обс}}}$, которая носит название *плотности потока освобождения заявок*. Отношение $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ называется *приведенной плотностью* потока заявок.

В случае судов приведенная плотность потока заявок составляет

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{T_{\text{обс}}}{T_{\text{инт}}} . \quad (2)$$

Величина α в формуле (2) показывает, какое количество новых заявок поступает в среднем в систему за время обработки одной заявки. Приведенная плотность связана с числом каналов обслуживания и их занятостью. Действительно, среднее число заявок, поступивших в течение произвольного интервала времени T , равно N или $T = T_{\text{инт}} \cdot N$. Совокупный бюджет времени, беспечиваемый n каналами обслуживания за этот интервал времени — $T_{\text{бюдж}} = T \cdot n$; суммарное время занятости каналов за этот интервал времени — $T_{\text{раб}} = N \cdot T_{\text{обс}}$, откуда

$$k_{\text{исп}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{бюдж}}} = \frac{N \cdot T_{\text{обс}}}{T \cdot n} = \frac{N \cdot T_{\text{обс}}}{T_{\text{инт}} \cdot N \cdot n} = \frac{T_{\text{обс}}}{T_{\text{инт}} \cdot n} = \frac{\alpha}{n} \text{ или } \alpha = k_{\text{исп}} \cdot n . \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что граничный случай $\alpha = n$ связан со 100 % занятостью каналов обслуживания. В аналитических методах оценки требуемого количества каналов обслуживания, содержащихся в нормативных документах [8], обычно используется именно это соотношение.

В то же время как при $\alpha = n$, так и при $\alpha < n$ возникает очередь заявок, ожидающих обслуживания. В ТМО получены соотношения, которые для известных α и n позволяют оценить среднее время ожидания заявки (судна) в очереди на обслуживание и их среднее количество заявок (судов), находящихся в этой очереди. При $\alpha < n$ максимальное количество заявок (судов) может наблюдаться достаточно редко, в связи с чем требуется оценить «оптимально достаточное» количество каналов (причалов) n по критерию приведенных затрат. Недостаточное количество (дефицит) причалов приведет к возникновению очереди и связанным с ней потерям первого рода, избыток — к их неэффективному использованию, или потерям второго рода. Задавшись относительными удельными весами потерь от нахождения в очереди и оценив суммарную их величину, можно сравнить их с затратами на строительство дополнительных причалов, что и позволит определить *оптимальное* число причалов $n_{\text{опт}}$. Подобные аналитические результаты в явном (аналитическом, формульном, интенсивном) виде получены лишь для нескольких видов потоков событий: простейшего, нестационарного пуассоновского, потоков с ограниченным последствием — Пальма или Эрланга различных порядков. Тем не менее ТМО дала решение многих практически важных частных задач.

Указанные семейства зависимостей впервые были приведены в руководстве UNCTAD [9] в виде таблиц, без подробного обоснования и со скупыми ссылками на весьма специальную и труднодоступную литературу. На рис. 1 показаны семейства графиков, соответствующие таблицам [9], но полученные аналитически.

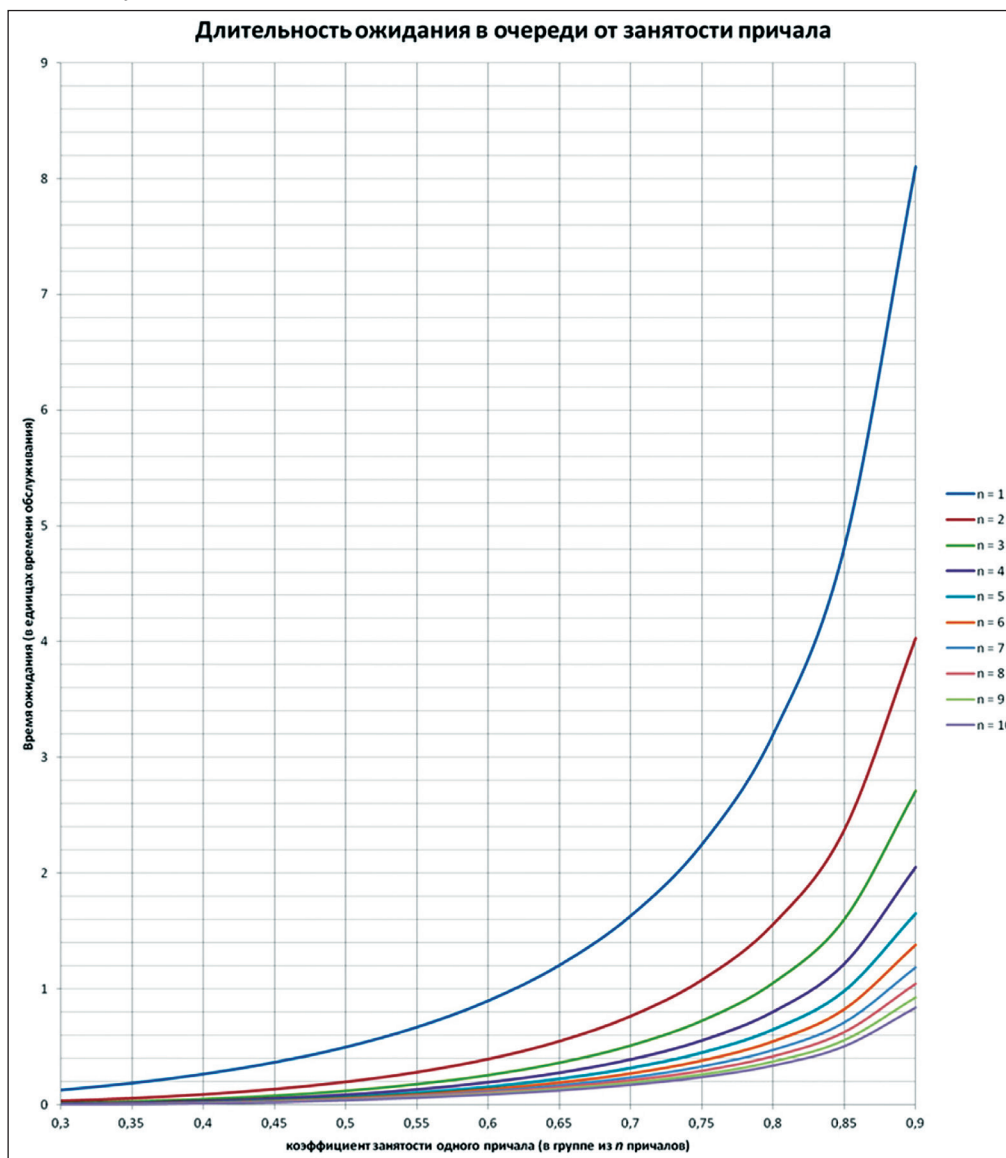


Рис. 1. Время ожидания в очереди на обслуживание

Пропущенное логическое звено в изложении материала, с одной стороны, и практическая полезность методики — с другой, в течение десятилетий сформировали отношение к данной методике как к истине в последней инстанции, создав препятствие для критического переосмысления, установления границ робастности и развития предлагаемых методов. Следствием этого стало и повсеместное использование величины в качестве исходного аргумента для расчетов, хотя по своему смыслу она носит промежуточный характер. В реальности исходным расчетным параметром всегда является грузопоток Q , описывающий поток заявок за исследуемый период. Логичнее было бы получить зависимости от грузопотока и количества причалов в порту двух основных параметров, интересующих судовладельца и портового оператора: среднего времени ожидания в очереди и коэффициента занятости. Учетом полученных значений, а именно вместимости среднего судна V и среднего времени его обслуживания $T_{\text{обс}}$, по классическим формулам могут быть получены искомые зависимости относительного ожидания и занятости причалов (рис. 2 и 3).

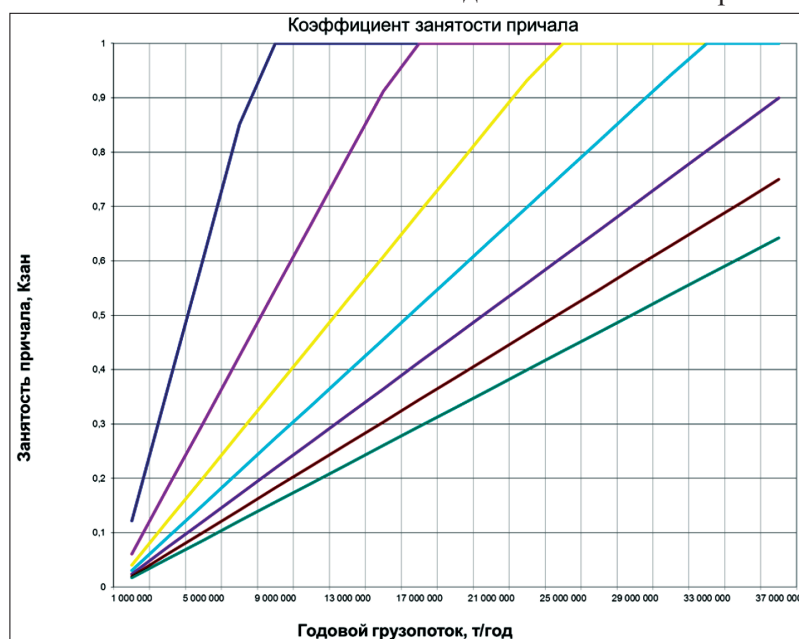


Рис. 2. Занятость причалов как функция грузопотока

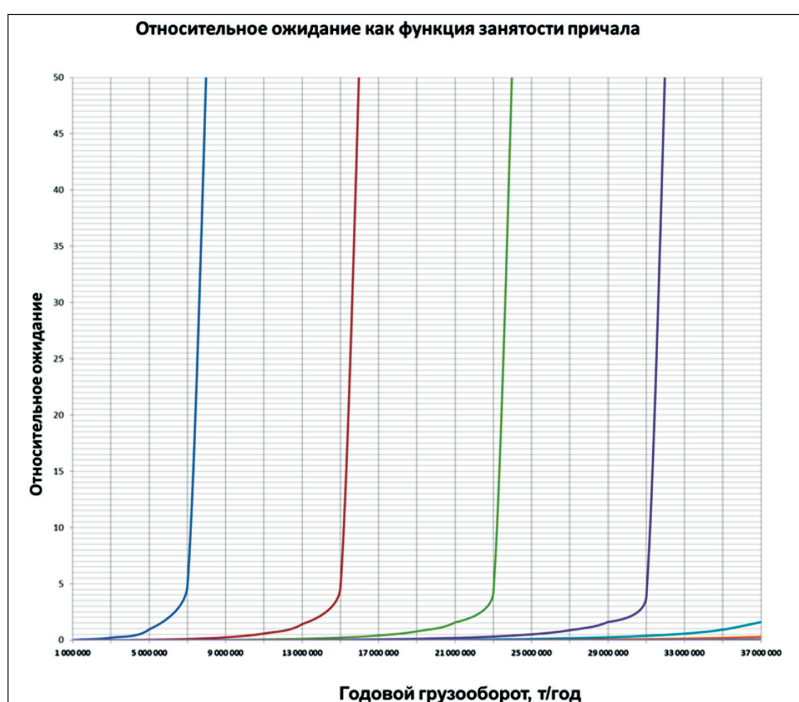


Рис. 3. Относительное ожидание как функции грузопотока

Иными словами, ТМО предоставляет аналитический расчетный инструмент, многократным повторным применением которого можно получить основные характеристики работы порта, интересующие его владельцев (стивидорных операторов) и клиентов (судоходные компании). Управляющим параметром служит грузопоток, возможными изменяемыми параметрами являются вместимость судна, количество причалов и интенсивность обработки судов на них. Условно структура модели показана на рис. 4.

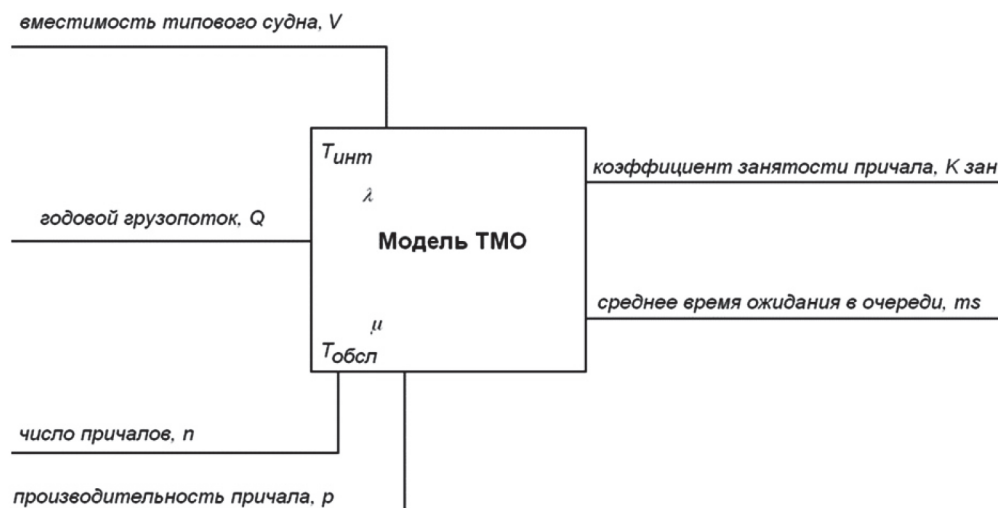


Рис. 4. Структура модели теории массового обслуживания

Существенным ограничением для использования методов теории массового обслуживания является природа потока транспортных средств. Как правило, в большинстве реальных случаев нарушаются основные требования к потоку, позволяющие использовать известные теоретические методы. В частности, поток транспорта практически никогда не бывает стационарным, поскольку коммерческие условия работы терминала и смежных объектов в цепи поставок (расписание движения, работа подходных каналов, внешних складов, органов контроля, офисов, действия муниципальных властей и т. д.) вызывают существенные неравномерности поступления транспорта. Эти неравномерности носят сезонный (летние поставки продуктов, квоты и пр.), месячный (например, предновогодняя торговля), недельный (увеличение потока в пятницу и понедельник), сменный (дневная развозка прямо в пункты торговли) и часовой (начало рабочего дня) характер. Возможное наложение всех этих факторов приводит к тому, что интенсивность поступления заявок на обслуживание от заданного проектом среднего значения отличается не на проценты, а в разы. Это вызывает методический вопрос: *на какую интенсивность ориентироваться при расчете характеристик: среднюю, которая не будет наблюдаться никогда (чаще всего реальные значения будут несколько ниже как компенсация пиковых всплесков), или максимальную, которая будет наблюдаться лишь в течение короткого промежутка времени.* В первом случае всплески интенсивности будут приводить к образованию очередей, для чего спланированная мощность может оказаться недостаточной. Во втором случае запланированное количество пунктов обслуживания, а значит, и связанные с ними ресурсы большую часть времени использоваться не будет.

В наиболее часто встречающейся постановке эта проблема может быть сформулирована следующим образом: рассчитываемыми ресурсами является число каналов обслуживания, определяемое из максимально допустимой длины очереди, заданными величинами являются интенсивности поступления и время обслуживания. В задании на проектирование следует указать, какой критерий и для какого грузопотока (максимального, среднего, минимального) используется и с каким качеством (время ожидания, длина очереди), какие ограничения являются строгими, а какие могут быть временно нарушены, на какое время и т. д. При отсутствии у заказчика предположений

о характере грузопотока, жесткости ограничений и потерь, связанных с дефицитом или избытком проектных ресурсов, следует выполнить расчет нескольких полярных вариантов.

Очевидно, что влияние того или иного закона распределения интервалов поступления партий на склад может оказаться намного значительным, чем это позволяет оценить распределение по тому или иному простому статистическому закону: показательному, степенному, нормальному, Эрланга и т. д. Это влияние может оказаться также более значительным, чем колебания объемов партий.

Следует учесть, что все результаты ТМО выведены для однородных по природе каналов обслуживания и поступающих заявок. Чем больше различия в этих элементах, тем менее точными становятся получаемые результаты.

Подход на основе имитационного моделирования

В основе модели, предлагаемой в данной работе в качестве более адекватного расчетного инструмента для технологического проектирования, лежат идеи, сформулированные в работе [10]. Пусть имеется заданный для рассматриваемого порта или грузового терминала грузопоток Q , который реализуется за некоторый выбранный интервал времени T (например, год, месяц или неделя) судами, вместимость которых задана дискретным распределением $P(V)$, например, как на рис. 5. Это распределение задает частоту p_i появления в потоке из N судозаходов за время T судов вместимостью v_i , что позволяет определить среднее количество судов каждого типа в потоке, состоящем из N судозаходов. Таким образом, для каждого типа судов появляется возможность оценить средний интервал между ними в потоке: $\tau_i = T/n_i$.

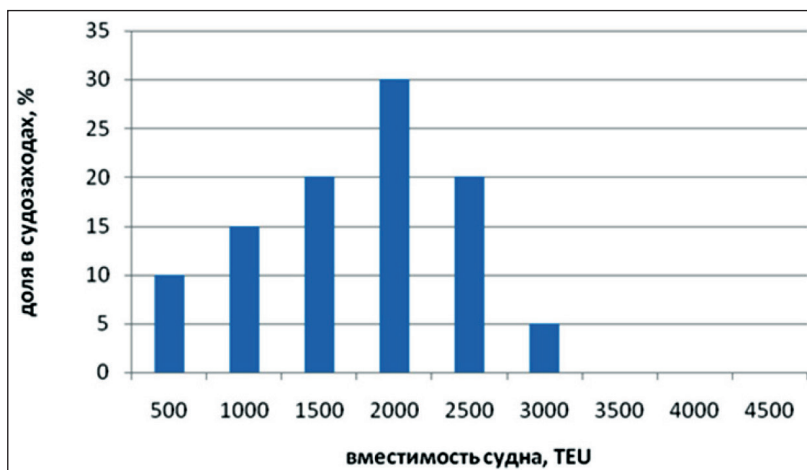


Рис. 5. Гистограмма распределения вместимости флота

Применение формул (1) – (3) позволяет для заданного грузопотока Q в течение выбранного интервала времени T по заданному распределению вместимости судов $P(V)$ вычислить средний интервал между подходами судов каждого класса (вместимости) v_i . В отдельные частные потоки могут быть также сведены суда равной вместимости, но различающиеся законами распределения интервала между ними.

Предположим далее, что для обработки судов имеется несколько различных причалов B_k : $k = 1, \dots, K$, характеристики которых (длина, допустимая осадка, оборудование, коммерческие условия контрактов с линиями и т. д.) позволяют принимать не все суда, а производительность оборудования дает возможность обрабатывать их за разные интервалы времени. В общем случае оборудование может составлять единый пул, распределяемый по тем или иным законам между отдельными причалами.

Введем в рассмотрение матрицу $[t_{ik}]$, элемент t_{ik} которой показывает, за какое время судно вместимости v_i обслуживается у причала B_k . Будем считать, что если $t_{ik} = 0$, то судно не может обслуживаться у данного причала (рис. 6):

$$\begin{vmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1K} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2K} \\ & & \dots & \\ t_{i1} & t_{i2} & \dots & t_{iK} \\ & & \dots & \\ t_{I1} & t_{I2} & \dots & t_{IK} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Рис. 6. Матрица обслуживания судна у причала

Входные потоки, рассматриваемые в данном исследовании, можно интерпретировать двумя способами: как разворачивающуюся во времени картину наступления тех или иных событий (прихода судов, постановки их к причалам или в очередь на обслуживание, освобождения причалов и пр.) или как сгенерированную за весь анализируемый период времени T картину уже фиксированных основных событий (захода судов в порт). Каждая из указанных интерпретаций имеет свои преимущества и недостатки. Для реализации требования минимизации вычислительных ресурсов, скорее всего, следует выбирать первую форму представления. В этом случае наиболее подходящей формой будет являться имитационное моделирование. Для наглядности описания, вариативного анализа, интерактивного вмешательства, ретроспективного разбора и др. удобнее представляется использовать второй способ.

На рис. 7 представлена структура предлагаемой модели.

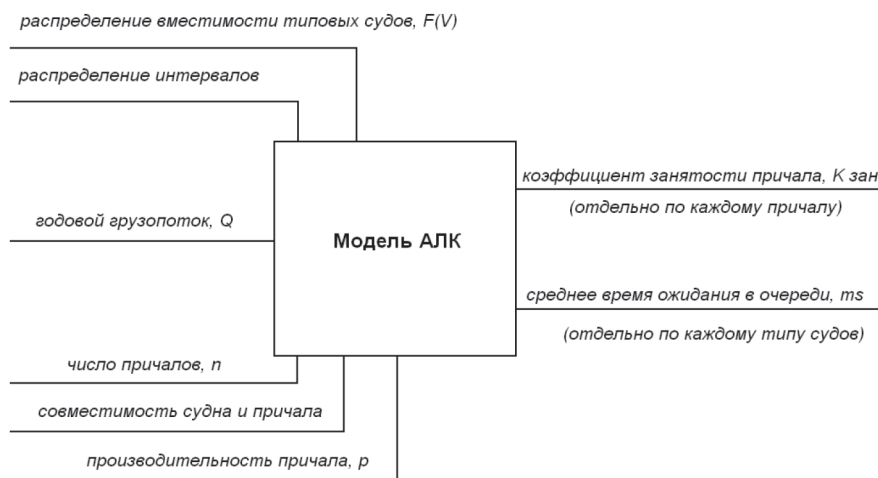


Рис. 7. Структура предлагаемой модели

Выходными величинами являются две векторных переменных: вектор средних коэффициентов занятости причалов

$$K_{\text{зан}} = \{k_{\text{зан}}^m\},$$

$$\text{где } k_{\text{зан}}^m = (\sum_k \cdot l_k^m \cdot t_k^m) / (L_m \cdot T_6);$$

l_k^m — длина судна k , обслуженного на причале m ;

t_k^m — время обслуживания судна k на причале m ;

L_m — длина причала m ;

T_6 — бюджет времени причала m ,

и вектор среднего времени ожидания в очереди по типам судов:

$$T_{\text{ожд}} = \{t_{\text{ожд}}^i\},$$

где $t_{\text{ожд}}^i = \sum_k t_{\text{очрд}_i}^k / \sum_k t_{\text{обсл}}^k$,
 $t_{\text{очрд}_i}^k$ — ожидание в очереди судна k типа i ;
 $t_{\text{обсл}}^k$ — время обслуживания судна k типа i .

Интегральными скалярными оценками для этих векторных величин являются средняя занятость причалов порта $k_{\text{зан}}^m = (\sum l_k \cdot t_k) / (L \cdot T_0)$ и среднее время ожидания по всем судам $T_{\text{ожд}}^{\text{ср}} = (\sum t_{\text{очрд}}^k) / (\sum t_{\text{обсл}}^k)$.

Планирование экспериментов и результаты моделирования

Имитационная модель совокупности причальных фронтов допускает моделирование произвольного судопотока (различные законы распределения интервалов, вместимость судов, время обработки у различных причалов) и произвольного количества невзаимозаменяемых причалов, специализирующихся по видам грузов, типам судов, коммерческой принадлежности. Прямое сравнение результатов моделирования с аналитическими расчетами невозможно, поскольку последние не обладают в состоянии учесть все указанные факторы. Для доказательства адекватности модели параметры судопотока и причалов устанавливались в соответствии с требованиями ТМО, и полученное совпадение служило доказательством адекватности используемой модели.

На рис. 8 и 9 показаны типичные результаты моделирования судопотока, представленного десятью различными типами судов, каждый из которых обслуживается на своем подмножестве причальных фронтов.

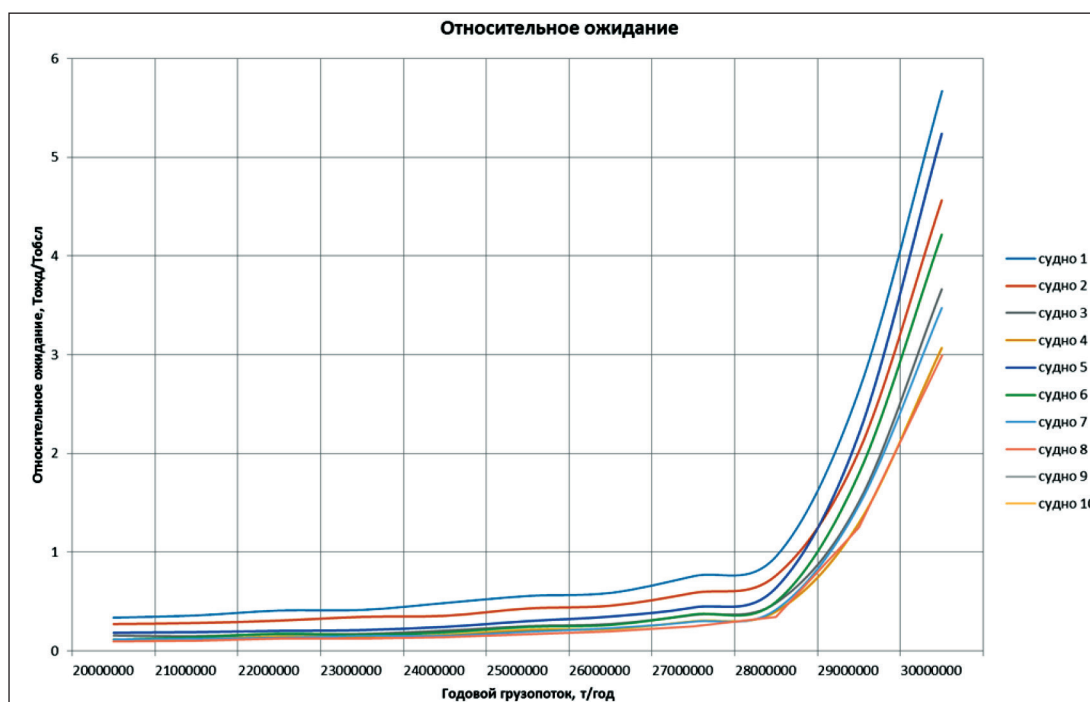


Рис. 8. Полученные моделированием значения относительное ожидание

Из приведенных на рис. 9 данных видно, что с изменением грузопротока от 20 до 27 млн условных тонн относительное ожидание для всех классов судов и занятость всех причалов равномерно растут. В районе 27 – 28 млн т начинается резкий рост относительного ожидания, что свидетельствует о достижении пропускной способности причального фронта. Косвенным доказательством служит также приближение занятости всех причальных фронтов к 100 %. Для выбранного проектного объема грузопротока (например, 27 млн т) можно провести серии экспериментов, позволяющих оценить образующуюся очередь судов в ожидании обслуживания. На рис. 10 и 11 показаны динамика очереди за период моделирования (год, или 8760 ч) и гистограмма распределения длины очереди в этом эксперименте.

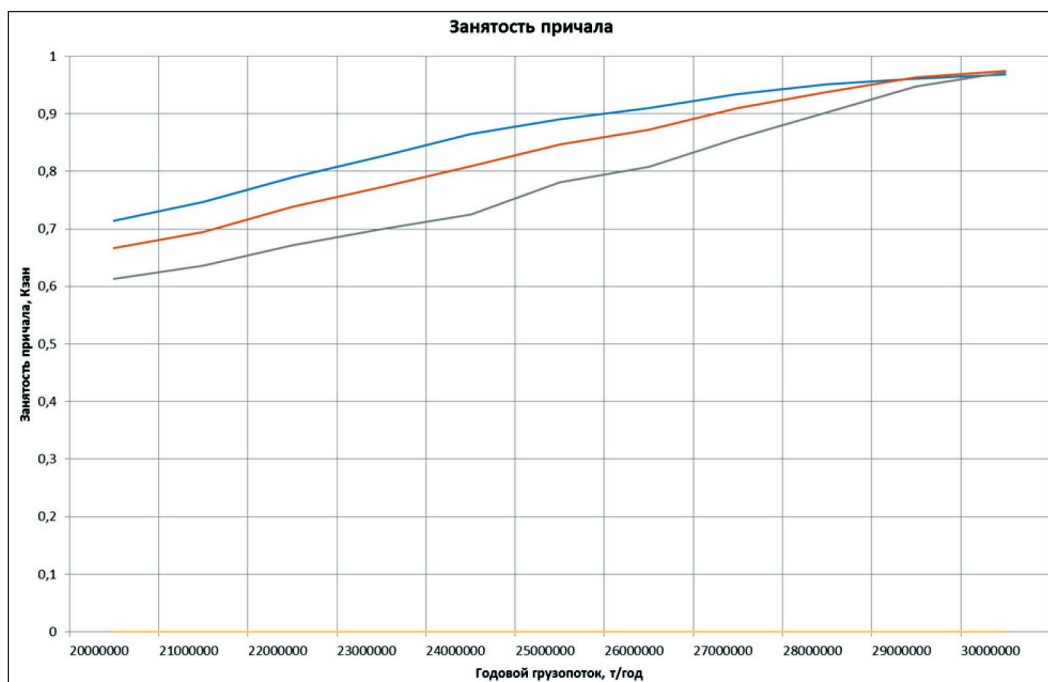


Рис. 9. Полученные моделированием графики занятости причалов

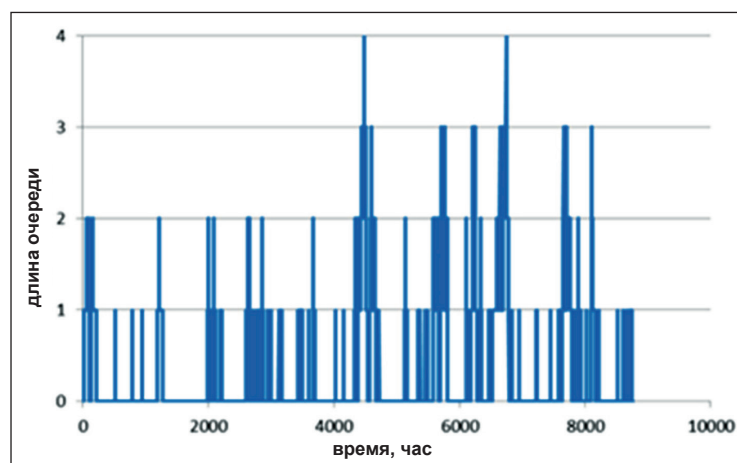


Рис. 10. Полученная моделированием динамика очереди судов

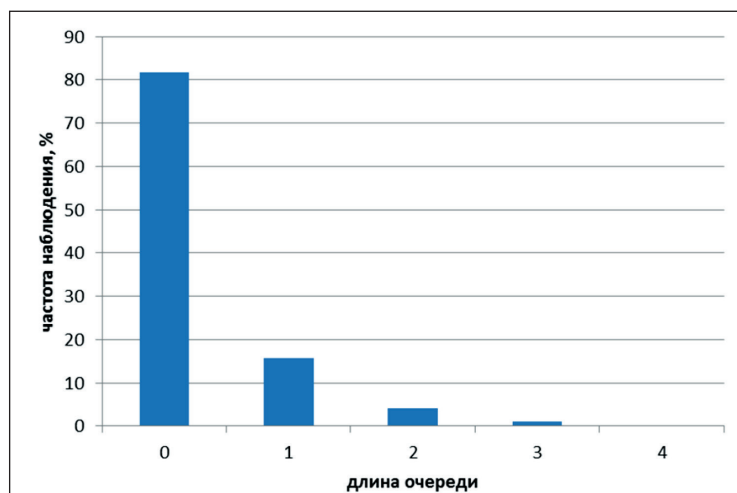


Рис. 11. Гистограмма распределения значений длины очереди

Отдельные серии экспериментов с моделями дают интересующие нас оценки значений. Для получения достоверных оценок эксперименты следует планировать таким образом, чтобы их результаты, примеры которых показаны на рис. 8 – 11, незначительно отличались друг от друга, что является функциональным аналогом метода доверительных интервалов.

Выводы

1. В статье проанализированы методологические принципы, лежащие в основе методов традиционного аналитического расчета требуемого числа причалов, на основании которых сделан вывод о невозможности использования указанных нормативных методов для оценки потребности современных портовоориентированных логистических кластеров в причальных фронтах.

2. Существующие и рекомендуемые к использованию в соответствии с нормативными документами методы строятся на предположении об однородных каналах обслуживания (причалах), однородных заявках (судах), простейшем характере случайного потока заявок, что оказывается совершенно неприемлемым для рассматриваемой задачи.

3. В качестве необходимого расчетного инструмента предлагается использовать имитационную модель, допускающую различные дисциплины судозаходов, множественные типы судов и невзаимозаменяемые причальные фронты.

4. Обоснована необходимость установления адекватности предлагаемого инструмента, в качестве средства доказательства выбрано последовательное сравнение получаемых результатов с аналитическими методами и методами ТМО.

5. Обсуждаются эксперименты предлагаемого метода, предоставляемые им новые возможности и эффективность для решения поставленной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 1 (44). — С. 30–33.
2. 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.
3. Кузнецов А. Л. Пространственное развитие портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Инновации. — 2015. — № 2 (208). — С. 115–120.
4. 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.
5. 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.
6. Kuznetsov A. L. Simulation tool for service quality and berth occupation assessment / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // Proceedings of the 15th International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelSta'15), 21–24 October 2015, Riga, Latvia. — 2015. — P. 40.
7. Кузнецов А. Л. Схемы обработки морских торговых судов с контейнеризованным грузом / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — Тематическое приложение 1. — С. 45–47.
8. Нормы технологического проектирования морских портов. РД 31.3.05-97. — М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 1998. — 177 с.
9. Port development. A handbook for planners in developing countries. — Second edition. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
10. Kuznetsov A. L. Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2016. — Vol. 10. — Nr. 3. — Pp. 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

ASSESSMENT OF THE BERTH DEMANDS FOR THE PORT-ORIENTED LOGISTIC CLUSTER

The paper analyses the trend of port-oriented logistic clusters' development where sea cargo fronts play more and more important role. The key role of the berths in the resulting efficiency of these infrastructural objects is identified. The task of the complex berth capacity evaluation of heterogenous nature is discussed and defined. The port is a natural location place of collision of many participants' interests. A contradiction between well-known techniques recommended by the technologic norms of sea port design and the practical demands is shown. The gnoseological reasons for this contradiction are identified. The limitation of the classic queuing theory models is discussed. As the result of this discussion, the paper offers a new evaluation techniques base on the object-oriented simulation. There are certain recommendation concerning the experiment planning procedure. The non-inerchangability of the berths is assumed both in cargo/vessels aspect and commercial factors. The paper discusses the results of simulation experiments proving the adequacy and resultativeness of the propsed techniques for the assessment of the berth demands for the port-oriented logistic cluster. The models put forward by this investigation provide the features which can not be achieved by any analytic or quering theory models, thus offering an unique and powerful tool for the port design technology.

Keywords: logistic clusters, port design techniques, queuing theory, agent simulation.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., Ya. Ya. Eglit, and A. V. Kirichenko. "On the issue of organising the operation of a transport hub." *Transport of the Russian Federations* 1(44) (2013): 30–33.
2. 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.
3. Kuznezov, A. L., and A. V. Galin. "Spatial development of ports." *Innovations* 2(208) (2015): 115–120.
4. 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.
5. 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): C. 7–16.
6. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Simulation tool for service quality and berth occupation assessment." *Proceedings of the 15th International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelSta'15), 21-24 October 2015, Riga, Latvia.* 2015. P. 40.
7. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Shemy obrabotki morskikh togovykh sudov s kontejnerizirovannym gruzom." *Transport of the Russian Federations Tematicheskoe prilozhenie 1* (2014): 45–47.
8. Russian Federation. RD 31.3.05-97. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov. M.: Ministerstvo transporta Rossijskoj Federacii, 1998.
9. *Port development. A handbook for planners in developing countries.* Second edition. New York: UNCTAD, 1985.
10. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.3 (2016): 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыденко Александр Александрович — кандидат экономических наук. Председатель. Исполнительный комитет Координационного транспортного совещания государств-участников Содружества Независимых Государств
kaf_pgt@gumrf.ru
Китиков Алексей Николаевич — аспирант. Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydenko Aleksandr Aleksandrovich — PhD. Chairman. Executive committee of the Coordination Transport Meeting of States-members of the Commonwealth of Independent States
kaf_pgt@gumrf.ru
Kitikov Aleksey Nikolaevich — postgraduate. Supervisor:
Kuznetsov Aleksandr Lvovich — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2016 г.

СИНЕРГЕТИКА КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА РАЗВИТИЯ БАЗОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОРТООРИЕНТИРОВАННОЙ ЛОГИСТИКИ

На основе анализа существующей теории прогнозирования и управления развитием портов сделан вывод о наличии противоречия между существующими моделями и требованиями практики. Исторически сложившийся инструментарий моделей развития, детально рассмотренный в предыдущих публикациях авторов и кратко описанный в данной статье, не дает ответа на стратегические вопросы, интересующие лиц, принимающих решения о будущем развитии конкретного порта. Существующие модели в большей степени объясняют то, почему порт развивался по тому или иному сценарию, не давая каких-либо возможностей для оценки возможных вариантов будущего развития. В статье постулируется невозможность создания единой модели процесса развития порта на традиционных методологических принципах, в основе которых лежит сама природа изучаемого явления. Поскольку современный порт является сложной ступенчатой многоуровневой динамической системой, он не может быть адекватно отображен с помощью традиционной линейной системы, которая является методологическим упрощением реальности. Как следствие, создаваемые в рамках линейной парадигмы модели портов отличаются существенной потерей основных свойств, что изначально ограничивает сферу их применимости. В целях изучения стратегических характеристик развития портов, особенно включенных во взаимодействующие пространственно-экономические кластеры, целесообразным представляется использовать апробированную в других областях знания методологию, основанную на синергетических законах развития систем произвольной природы. Принципиальной задачей авторов являлось не перенесение общих положений этой дисциплины и создание методологической концепции, уже начинающей проникать в сферу транспортного бизнеса, а получение конкретных моделей развития, ориентированных на изучение не только качественных, но и количественных характеристик изучаемых объектов. Приведены результаты моделирования взаимодействия и развития популяции портов, обслуживающих один хинтерленд, которые подтверждают сформулированные теоретические предположения и возможность достижения поставленных целей.

Ключевые слова: порт, модели, логистика, синергетика, хинтерленд.

Анализ существующих подходов к прогнозированию развития портов

Глобальные изменения в мировой экономике и транспортной инфраструктуре, произошедшие в течение последних десятилетий, не могли оставить в стороне морские порты. Сегодня эти ключевые инфраструктурные элементы продолжают находиться в поиске решений, позволяющих справиться с современными вызовами: тесной конкуренцией, растущими экологическими требованиями, дефицитом площадей территорий и акваторий, ростом потребности в резервах пропускной способности, логистическим требованиям к гибкости принятия решений при управлении цепями поставок и многими другими [1]. Очевидно, что успех или провал в решении данных вопросов зависит от правильности постановки целей, которые порт выбирает для своего развития, а также выбора путей достижения поставленных целей. Капиталоемкость строительства портовой инфраструктуры и определенная необратимость этого процесса обуславливают высокую цену ошибок в определении направления развития.

Исследование теории и практики прогнозирования и управления развитием портов активно проводится начиная с середины XX в. Результатом явилось создание ряда моделей, описывающих этапы развития портов под воздействием конкретных сил, определяющих, по мнению исследователей, итоговый (результатирующий) «вектор», характеризующий перспективы конкретного порта. Первая модель развития портов была предложена английским ученым Д. Бердом в 1980 г. Она на содержательном уровне описывала то, как портовые инфраструктуры развиваются во времени и пространстве [2]. Несмотря на первоначально показанную результативность, модель Берда

обнаружила недостаточную универсальность, которую неоднократно пытались скорректировать введением ряда дополнительных фаз развития, которые, с одной стороны, позволяли лучше объяснить процесс развития конкретного порта, а с другой — приводили к утрате универсальности модели. Многие ученые согласились с предложением канадского ученого Ж.-П. Родригэ о том, что все ступени развития могут быть сгруппированы в три основные фазы: становление, расширение и специализация [3].

В то же время Берд подчеркивал, что его модель разрабатывалась на основе этапов развития определенных портов и не была предназначена соответствовать всем портам. Он признал, что модели развития портов могут основываться на различных факторах. В частности, его модель, названная «Anuport», основывалась на развитии портовых сооружений для соответствия растущим потребностям морского флота, не учитывая такие факторы, как взаимоотношение «город – порт», развитие доступности хинтерленда и специализации портов [4].

В 1985 г. Конференция ООН по торговле и развитию (UNCTAD) предложила свою концепцию развития портов, обобщив полученные Бердом и его последователями результаты и делая основной упор на грузоведческие аспекты портовых операций [5]. Увеличение коммерческой составляющей, усилия по расширению портовой территории, появление концепции порта как *центра оказания услуг* — все это потребовало нового осмысления, *как и почему* должны развиваться порты. К концу XX в. UNCTAD, обратив внимание на радикальные изменения роли портов в мире, инициировала новый этап исследований по разработке модели развития портов. В результате была предложена концептуальная модель, включающая три обобщенные фазы, или «поколения», развития портов [6]. Принцип деления был основан на совокупности ключевых факторов: политики развития порта, его стратегии, сферы деятельности и границ расширения портовой зоны, степени интеграции портовых функций и организационной структуре порта. В то же время в концепции не был учтен ряд важных факторов, таких, например, как масштабность порта, его геополитическое положение, соотношение государственных и частных форм владения. Развитие изучалось в некотором дискретном, «модульном» времени, а переход от поколения к поколению связывался с ростом порта, частично определяемого мотивацией лиц, принимающих решения.

Описываемая модель была полезным инструментом анализа и сравнения, что делало ее популярной и признанной в течение нескольких десятилетий. В то же время упрощенный взгляд на развитие порта, присущий этой модели развития, делал ее все менее реалистичной и точной, не отражающей события бурно развивающегося мира портовой индустрии. Специалистами-практиками было отмечено, что развитие портов не реализовывалось отдельными «дискретными» стадиями и не все порты проходили одни и те же циклы для перехода в третье поколение. Более того, отдельные терминалы порта демонстрировали дифференцированное развитие, отвечая на специфические запросы. Коммерческое давление и цели являлись основным фактором, определяющим это развитие, а внедрение нового оборудования и технологий являлось непрерывным процессом. Как следствие, даже самые передовые с точки зрения системности, оборудования или проектов терминалов порты часто сохраняли рудименты ранних стадий развития, которые вносили свой вклад в общую эффективность [4]. Кроме того, судостроение и организация судоходства демонстрировали изменения, которые не предполагались при создании модели 80-х гг. XX в. Возникла также значительная сложность объективного отнесения порта к тому или иному поколению: эта процедура была достаточно субъективной, а, значит, связанной с риском ошибок, поскольку каждый порт в большей или меньшей степени является уникальным [3].

Выполненный анализ показал, что большинство важных процессов, описываемых с точки зрения последовательных поколений портов моделью UNCTAD, были определены неоднозначно и неточно. Развитие не фиксируется в определенный момент времени и не обязательно проходит цикл развития, чтобы получить статус *порта третьего поколения*. Модель выделения дискретных «портовых поколений», таким образом, не может точно отражать портовую отрасль в глобальном масштабе. При внимательном изучении становится ясным, что указанная модель не от-

ражает ситуацию, которая сложилась в течение последних четырех десятилетий. Широкий круг других факторов, таких, например, как размер порта, географическое положение, трудовая культура, степень общественной и личной вовлеченности, продемонстрировали серьезные изменения. Указанные обстоятельства привели к появлению новой концепции модели развития портов, получившей название *WORKPORT* [7]. Эта модель в значительной мере расширила круг вовлекаемых в анализ факторов и характеристик, в ее рассмотрение были включены новые связи и закономерности и тем самым она послужила важным шагом в развитии теоретических положений. В то же время она уклонилась в сторону содержательного описания и констатации событий, затруднив использование ее как инструмента прогноза и обобщенного анализа чувствительности вида «если ..., то ...». Кроме того, данная модель не полностью отражала роль опережающего развития логистического фона и изменения транспортных процессов.

Ответом на возникшие общественные потребности в сфере портового и транспортно-логистического бизнеса в конце XX в. стали предложенные Ж.-П. Родригэ и Т. Е. Ноттебумом модели, развивающие эти представления [3]. В них объединялись разные подходы и учитывались урбанистические аспекты развития. К модели портового развития Берда авторы добавили фазу «портовой регионализации». Это позволяло объяснить причины появления и развития портов транзитного, формирование логистических полюсов и иных аспектов интеграции портов в хинтерленд. Ключевое отличие модели портовой регионализации заключается в том, что она изучает развитие портов в динамике, рассматривая хабы, тыловые логистические платформы и морские порты как единую систему, формирующую сети грузораспределения.

Авторы модели отмечали, что переход к фазе портовой регионализации представляет собой постепенный и управляемый рынком процесс, оказывающий влияние на порт и отражающий повышенное внимание участников рынка к интеграции логистики. В то же время модель не раскрывала детально важные с точки зрения развития портов вопросы: *каким образом регионализация влияет на развитие портов, какую роль играет каждый из участников процесса регионализации, какие стратегии портов (терминалов, муниципального руководства порта и городов) должны приниматься, чтобы управлять этим процессом.*

Модели, рассмотренные в статье, со временем развивались и дополнялись усилиями последователей и подражателей, становясь все более сложными и обретая, таким образом, собственную ценность теоретических построений [4]. Однако такие трансформации делали рассматриваемые модели все менее приспособленными для прогнозирования развития определенного порта, а это являлось именно тем обстоятельством, которое необходимо практическим специалистам. Таким образом, становится очевидным невозможность создания единой модели развития всех типов портов, и гносеологическая причина этого скрыта не в «слабости» концептуальных построений, а в самой природе изучаемого явления.

Синергетика как парадигма изучения развития портов

Современный порт, являясь сложной, ступенчатой, многоуровневой динамической системой, представляет собой совокупность взаимосвязанных производственных элементов, образующих устойчивую целостность, и не может быть адекватно отображен с помощью упрощенной линейной системы без потери своих основных свойств. В связи с этим для изучения свойств объекта целесообразно использовать методологию, основанную на научном направлении — *синергетике*, уже доказавшем свою результативность во многих доменах знания.

В основе синергетики лежит поиск общих закономерностей временного развития систем любой природы. Отрешаясь от специфической природы систем, синергетика обретает способность описывать их эволюцию на некотором универсальном языке. Она устанавливает тождественность, или изоморфизм явлений, изучаемых специфическими средствами различных наук, но имеющих общую модель (точнее, приводимых к этой общей модели). Обнаружение единства модели позволяет синергетике делать достижения одной области науки доступными для понимания представителями другой, возможно, весьма далекой от нее области науки [8].

В синергетике сформированы три основные концепции, характеризующие изучаемые системы: неравновесность, открытость и нелинейность. *Неравновесность* — это состояние открытой системы, при котором происходит изменение ее макроскопических параметров, т. е. ее состава, структуры и поведения. Под *открытостью* понимается способность системы постоянно обмениваться веществом (энергией, информацией) с окружающей средой и обладать как «источниками» — зонами подпитки ее энергией окружающей среды, так и «стоками» — зонами рассеяния, «сброса» энергии. Под *нелинейностью* понимается свойство системы иметь в своей структуре различные стационарные состояния, соответствующие различным допустимым законам поведения этой системы.

Всякий раз, когда поведение таких объектов удастся выразить системой уравнений, эти уравнения оказываются нелинейными в математическом смысле. Нелинейность также рассматривается как необычная реакция на внешние воздействия, когда «правильное» воздействие оказывает большее влияние на эволюцию системы, чем воздействие более сильное, но организованное неадекватно ее собственным тенденциям [9]. В этом смысле важным достижением синергетики является открытие *механизма резонансного возбуждения*. Это означает, что система, находящаяся в неравновесном состоянии, крайне чувствительна к воздействиям, согласованным с ее собственными свойствами. Малые, но согласованные с внутренним состоянием системы внешние воздействия на нее могут оказаться более эффективными, чем большие, но несогласованные.

Открытые нелинейные системы могут по-разному реагировать на действие внешних сил и изменения внутренних факторов. В одних случаях система ответит на них возникновением сильных тенденций возврата к старому состоянию, структуре или поведению, в других случаях — она может разрушиться. И, наконец, существует возможность формирования новой структуры и изменения состояния, поведения и / или состава системы. Любая из описанных возможностей может реализоваться в так называемой *точке бифуркации*, вызываемой указанными воздействиями, в которой система испытывает неустойчивость. Точка бифуркации представляет собой переломный, критический момент в развитии системы, в котором она осуществляет выбор пути; иначе говоря, это точка ветвления вариантов развития, точка, в которой происходит *катастрофа*. Термином «катастрофа» в концепциях самоорганизации называются качественные скачкообразные изменения.

Синергетика дополняет системный подход изучением сложных структур, находящихся вдали от равновесия. Из кибернетики и системного анализа известно о существовании в системе некоторых механизмов коллективного взаимодействия — обратных связей. Когда коллективное системное взаимодействие элементов приводит к тому, что те или иные движения составляющих подавляются, следует говорить о наличии отрицательных обратных связей. Собственно говоря, именно отрицательные обратные связи и создают «традиционные» системы, понимаемые как устойчивые, консервативные, стабильные объединения элементов. Однако, когда система уходит от равновесия, доминирующую роль начинают играть положительные обратные связи, которые не подавляют, а, наоборот, усиливают индивидуальные движения составляющих. Малые воздействия и незначительные прежде процессы выходят на макроуровень. Положительные обратные связи приводят к потере системой устойчивости своей организации, поскольку весьма малое возмущение может иметь большие последствия. Петля положительной обратной связи делает возможным в далеких от равновесия состояниях усиление очень слабых возмущений до гигантских волн, разрушающих сложившуюся структуру системы и приводящих ее к революционному изменению — резкому качественному скачку [10].

С точки зрения математики можно считать, что в процессе моделирования любая динамическая система изменением своих параметров («координат») описывает движение некоторой «изображающей» точки в пространстве, называемом *фазовым*. Фазовое пространство дает удобное средство для наглядного представления поведения динамической системы. Изменение состояний системы во времени, т. е. последовательную смену ее состояний, можно представить линией в фазовом пространстве (пространстве возможных состояний системы, не зависящих от времени).

Фазовые траектории (линии в фазовом пространстве) позволяют увидеть всю совокупность движений, которые могут возникнуть при всевозможных начальных условиях. В картине фазовых траекторий важную роль играют *аттракторы*, характеризующие поведение системы в фазовом пространстве по прошествии некоторого (достаточно длительного) времени. Иными словами, это точка или множество в фазовом пространстве, к которым стремятся («притягиваются») все траектории из некоторой окрестности аттрактора, называемой также *областью, или бассейном, его притяжения*. Траектории, выйдя из начальных состояний, в конце концов, приближаются к аттракторам [9].

Иными словами, аттракторы — это понятие, обозначающее активные устойчивые центры потенциальных путей эволюции системы, способные притягивать и организовывать окружающую среду. Теория аттракторов позволяет понять суть управления сложными системами. Аттракторы делят пространство всех возможных состояний на некоторые области притяжения, попав внутрь которой система неизбежно эволюционирует к соответствующему аттрактору. Этим обуславливается пороговость любого внешнего воздействия на систему. Воздействие может быть эффективным и изменить тенденции системы, только если оно переводит состояние системы в область притяжения другого аттрактора. Чем ближе система к асимптотической стадии развития, к своему аттрактору, тем сложнее «переключить» ее на другой аттрактор. Пороговость воздействия играет здесь первостепенную роль. Прежний аттрактор «не отпускает» систему, и нужно приложить существенные усилия, чтобы преодолеть существующие тенденции для выхода из его области притяжения. Длительное, но слишком слабое или неправильно топологически направленное воздействие будет лишь пустой тратой времени и энергии, система вновь вернется на прежний путь.

Синергетические модели портового развития

Синергетика является чрезвычайно мощным аппаратом, и, как показало исследование, даже только в качестве философской доктрины способна помочь определить возможные направления траекторий развития портов. Однако роль синергетики может быть гораздо более полезной, если ее использовать не только как философскую, но и как математическую основу прогнозирования развития портов. Синергетический взгляд на портовое развитие использовался и ранее, но только лишь в качественной составляющей аспекта [11]. Ниже представлено использование другой стороны синергии, с помощью которой выполнен ряд моделей развития портов. Представленные модели достаточно просты, так как задачей работы является доказательство самой возможности использования синергетики для построения моделей развития портов, а не создание усложненных моделей.

Моделирование взаимодействия двух портов. Рассмотрим процесс моделирования развития двух портов, обслуживающих общий хинтерленд, опирающийся на синергетические законы развития сложных систем. Пусть на некотором побережье размещаются два порта, конкурирующие за один и тот же грузопоток $Q[k]$, который является нелинейным и описывается, например, функцией

$$y = a + b \cdot \sin(cx + d),$$

где a , b , c и d — коэффициенты, определяющие характер грузопотока:

- a — учитывает начальный уровень грузопотока;
- b — учитывает степень колебания грузового потока в единицу времени;
- c — учитывает частоту изменения (колебания) грузопотока;
- d — определяет направление развития грузопотока.

Этот грузопоток делится между двумя портами, образуя для каждого из них свои грузопотоки $z_{1[k]}$ и $z_{2[k]}$.

Каждый из портов описывается своими зависимостями:

Порт 1

- входящий поток заявок — $z_{1[k]}$;
- ресурс обработки заявок — $r_{1[k]}$;
- очередь заявок — $q_{1[k]} = \text{если } [z_{1[k]} + q_{1[k-1]} > r_{1[k]}], \text{ то } [z_{1[k]} + q_{1[k-1]} - r_{1[k]}], \text{ иначе } [0];$
- обработка заявок — $z_{1[k]} = \text{если } [z_{1[k]} + q_{1[k-1]} > r_{1[k]}], \text{ то } [r_{1[k]}], \text{ иначе } [z_{1[k]} + q_{1[k-1]}].$

Порт 2

- входящий поток заявок — $z_{2[k]}$;
- ресурс обработки заявок — $r_{2[k]}$;
- очередь заявок — $q_{2[k]} = \text{если } [z_{2[k]} + q_{2[k-1]} > r_{2[k]}], \text{ то } [z_{2[k]} + q_{2[k-1]} - r_{2[k]}], \text{ иначе } [0];$
- обработка заявок — $z_{2[k]} = \text{если } [z_{2[k]} + q_{2[k-1]} > r_{2[k]}], \text{ то } [r_{2[k]}], \text{ иначе } [z_{2[k]} + q_{2[k-1]}].$

Предположим, что грузовладельцы выбирают тот или иной порт в зависимости от уровня тарифов в нем и качества обслуживания, характеризующегося ожиданием судов в очереди на обслуживание.

Чем больше судов приходит в порт, тем ниже может быть величина тарифа порта как результат действия закона масштабной экономии. Оценка тарифной привлекательности порта может быть сделана, например, в виде $N_a = a / \sum_{i=k-T}^{k-1} z[k]$, т. е. с помощью величины, обратной числу обслуженных портом судов за некоторый интервал времени T .

Чем длиннее очередь судов, тем менее привлекательным для грузовладельца является порт. Оценку качества услуг можно выполнить с помощью функции $N_b = b / \sum_{i=k-T}^{k-1} q[k]$, т. е. с помощью величины, пропорциональной суммарному времени очереди судов за это время. Критерий оценки порта i можно представить в виде суммы $N_i = N_a + N_b$. Чем меньше величина N_i , тем более привлекательным является порт для грузовладельцев.

Вычислив значения N_1 и N_2 , можно предположить распределение грузопотока $Q[k]$ между портами в соотношении обратных величин: порт 2 получит долю $\frac{N_1^{-1}}{N_1^{-1} + N_2^{-1}}$, а порт 1 — долю $\frac{N_2^{-1}}{N_1^{-1} + N_2^{-1}}$ (рис. 1).

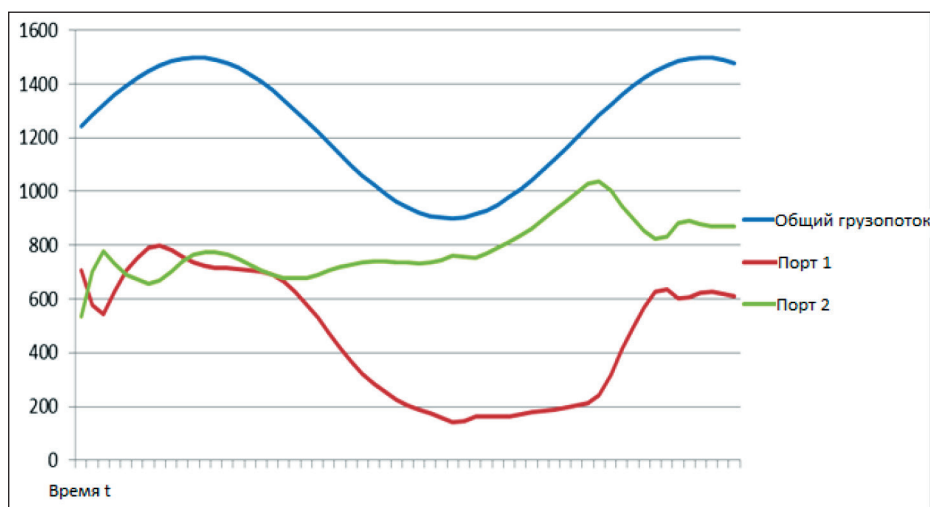


Рис. 1. Поведение модели взаимодействия двух портов

«Портрет» системы на фазовой плоскости грузопотоков показан на рис. 2.



Рис. 2. «Портрет» системы двух взаимодействующих портов на фазовом пространстве грузопотоков

Моделирование взаимодействия трех портов. С использованием того же алгоритма сформирована модель взаимодействия трех портов побережья. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3 и 4.

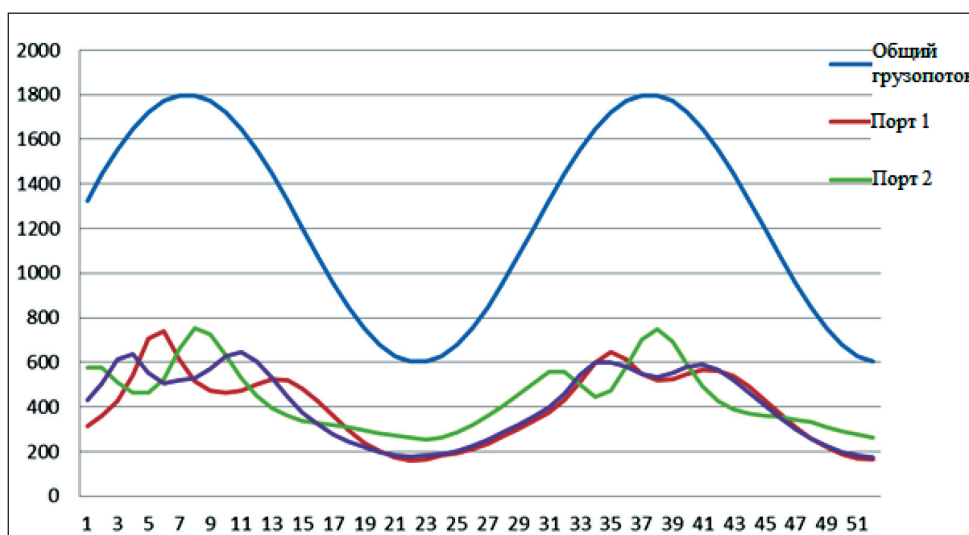


Рис. 3. Поведение модели взаимодействия трех портов

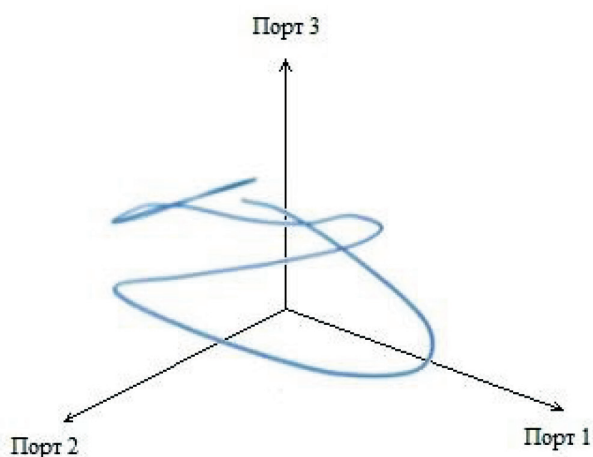


Рис. 4. «Портрет» системы трех взаимодействующих портов на фазовой плоскости грузопотоков

Исследование роста популяции портов побережья. Рассмотрим в произвольный момент времени k некоторое количество портов n_k , расположенных на территории с потенциалом территории грузового тяготения Q . Пусть эта территория способна обеспечить грузом всего n портов. Следуя синергетической традиции, введем новую величину $x_k = n_k / n$, которая является безразмерной, неотрицательной и не превосходящей единицы.

Пусть мы имеем возможность оценить численность «популяции» портов, например, один раз в год. Предположим, что грузообработка в портах генерирует определенных доход, который позволяет строить новые порты. Естественно предположить, что прирост «популяции» портов следующего поколения x_{k+1} есть линейная функция от текущего значения этой величины x_k :

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= rx_k; \\ 0 &\leq x_k \leq 1.\end{aligned}$$

Здесь $r > 0$ — параметр, физический смысл которого понимается как скорость развития популяции. (Например, при коэффициенте прироста в 5 % ($r = 0,5$) популяция удваивает свою численность каждые 14 лет).

Попытки применения математики к росту населения восходят к работам Т. Мальтуса, опубликованным в 1798 г. [12]. При сформулированном им законе роста популяции $x_{k+1} = rx_k$, его величина была неограничена, из чего ученым был сделан вывод о необходимости принудительного ограничения рождаемости. В то же время, ресурс грузопотоков остается постоянным или растет лишь арифметически. Следовательно, в какой-то момент времени, при исчерпании этого ресурса, развитие прекратится. В биологической популяции это проявляется как наступление голода, в популяции порта как освоение всего возможного грузопотока.

Таким образом, при ограниченных ресурсах естественно ожидать, что с увеличением популяции будет уменьшаться ее прирост: чем больше x_k , тем меньше параметр роста r . Как следствие, проблему можно решить изменением модели динамики популяции, например, за счет введения зависимости от предыдущего поколения. Простейшим образом это можно сделать, предположив замедление роста в форме $r(1 - x_k)$. Здесь величина $(1 - x_k)$ пропорциональна количеству имеющейся «пищи» для биологической популяции или «дохода» от грузовых операций в случае популяции портов. По мере приближения популяции x_k к единице, количество «пищи» сокращается, и параметр роста стремится к нулю. Получившийся закон роста популяции называется *квадратичным отображением*, или *логистической параболой*:

$$x_{k+1} = r(1 - x_k)x_k.$$

Можно показать, что условие $0 \leq x_k \leq 1$ соблюдается в диапазоне значений $0 < r < 4$.

В течение длительного периода времени считалось само собой разумеющимся, что функциональное поведение логистического уравнения принципиально не меняется с ростом параметра r . Лишь в 1971 г. при практических исследованиях динамики популяции рыб профессор Оксфордского университета Роберт Мэй заметил нечто настолько странное, что он образно сравнил это со «змеей, притаившейся в математической траве». При $r < 1$ популяция не выживала, не успевая восстанавливаться, и естественным образом приходила к вымиранию (нулевой численности), каково бы ни было начальное ее значение (рис. 5).

При $1 < r < 3$ модель показывала некоторую точку равновесия, к которой стремилась популяция вне зависимости от того, насколько далеко она находилась от этой точки вначале. Притяжение к равновесной популяции оказывалось тем сильнее, чем больше было значение r (рис. 6). Однако в окрестности $r \approx 3$ популяция начинала «осциллировать» между двумя различными уровнями равновесия. Так, при $r = 2,6$ (рис. 7) наблюдался «цикл периода 1» — стабильная популяция с единственным равновесным значением $x = 0,6154$.

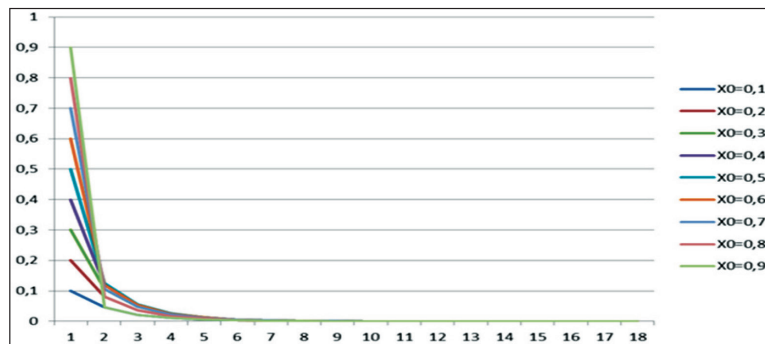


Рис. 5. Снижение популяции при $r < 1$

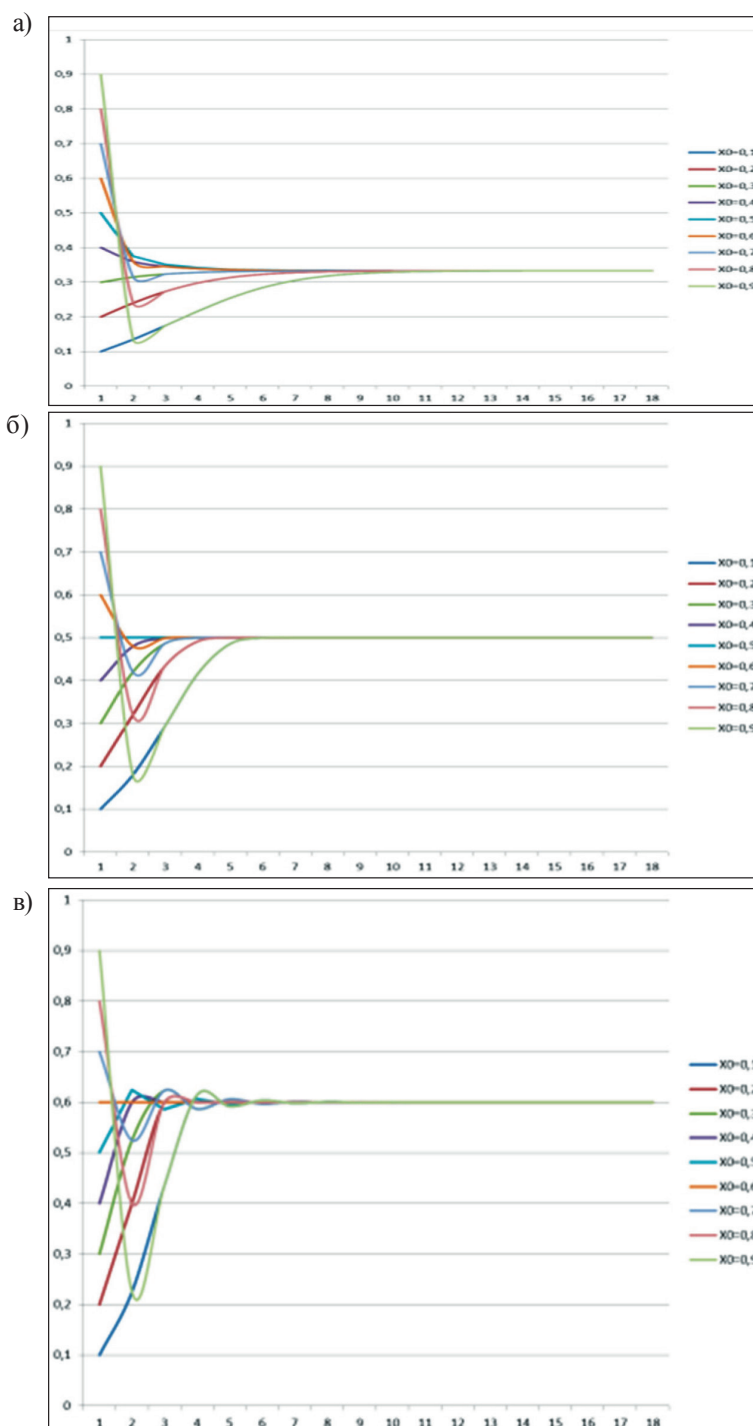


Рис. 6. «Притяжение» к равновесной популяции: а — при $r = 1,5$; б — при 2,0; в — при 2,5

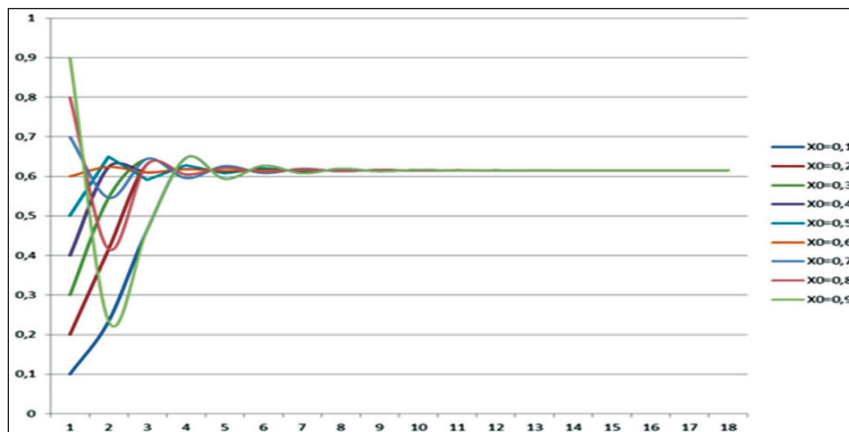


Рис. 7. Стабильная популяция при $r = 2,6$

При $r = 3,1$ (рис. 8) наблюдался «цикл периода 2», когда популяция осциллирует (периодически повторяет значения) между $x = 0,5582$ и $x = 0,7645$.

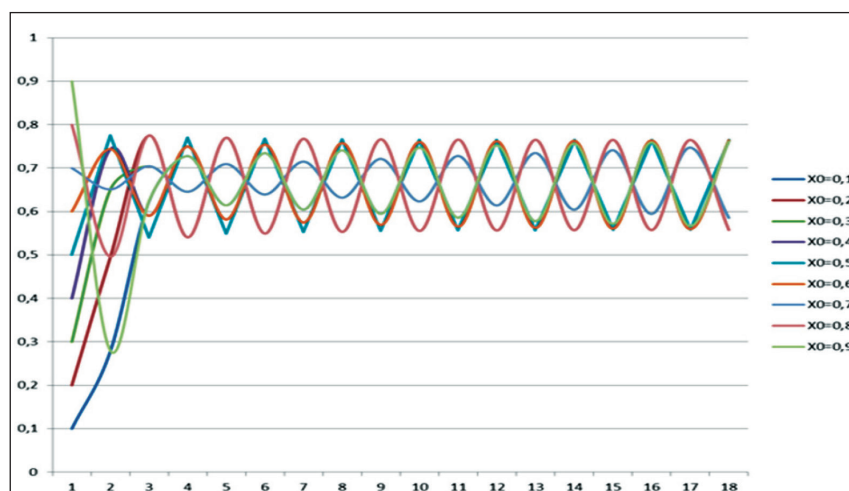


Рис. 8. Осцилляция значений популяции между двумя уровнями при $r = 3,1$

Такое явление, получившее название бифуркация (раздвоение), полностью противоречило традиционным представлениям. При увеличении величины r картина становилась еще более странной: два уровня сначала переходили в четыре, затем в восемь, шестнадцать, тридцать два и, в конце концов, вели к хаосу (рис. 9).

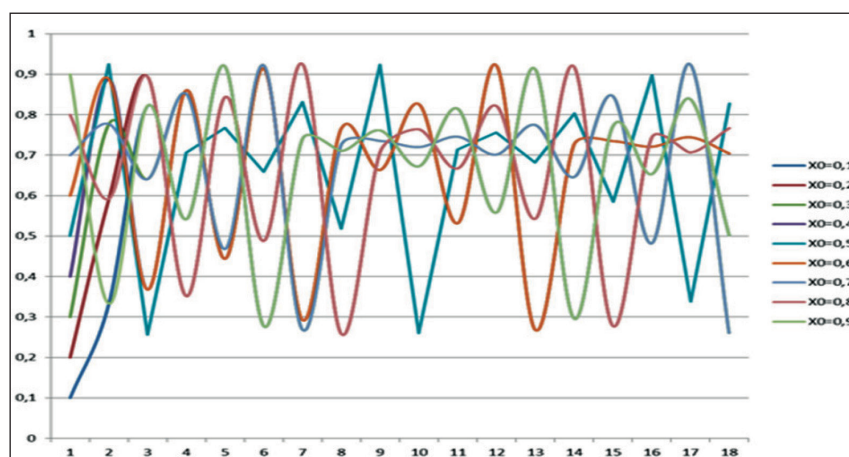


Рис. 9. Осцилляциям между множественными уровнями

Все изложенное ранее удобно представлять в виде бифуркационной диаграммы в координатах « $x - r$ » (рис. 10).

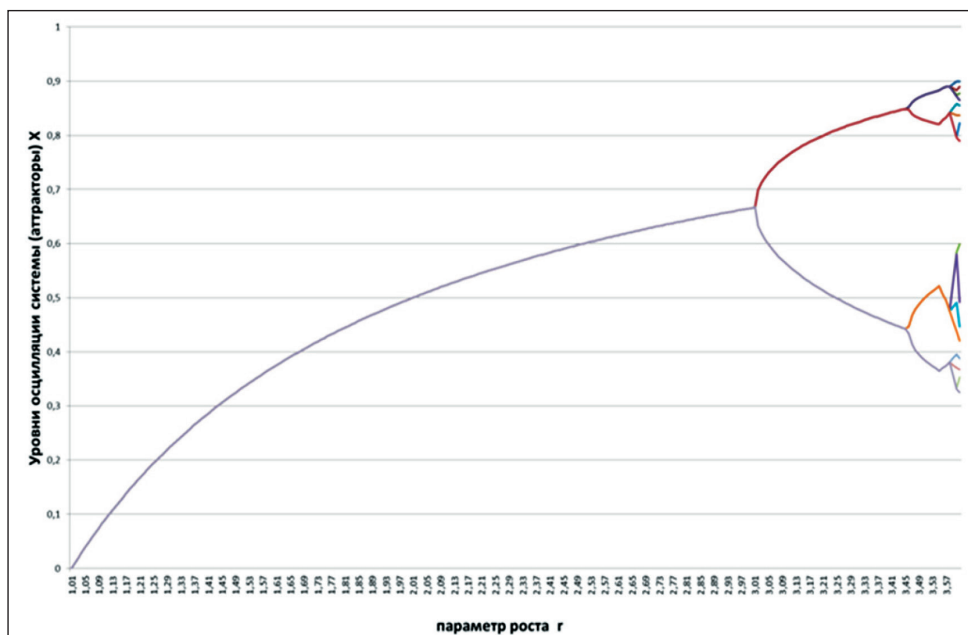


Рис. 10. Бифуркационная диаграмма

Модели, подобные рассмотренным, легко узнаваемы, они могут быть обнаружены во многих исследованиях, основанных на синергетических принципах. Причина, по которой они были представлены в работе, достаточно проста — *доказать, что синергетика успешно применима для исследования направлений портового развития*. Кроме того, рассмотренные модели убедительно доказывают свою жизнеспособность с математической точки зрения.

Синергетика в примерах развития портов

Проанализируем примеры развития портов, подтверждающие основные принципы синергетики: резонансное возбуждение и точки бифуркации.

Резонансное возбуждение (порт Барселона). Примером использования механизма резонансного возбуждения, при котором малые, но согласованные с внутренним состоянием системы внешние воздействия на нее могут оказаться более эффективными, чем большие, но не согласованные, может служить развитие порта Барселона. Широко известно о значительном росте грузооборота порта Барселона в период с 1998 по 2006 гг. Этот феноменальный случай не раз упоминался в работах различных авторов [13], [14]. Власти порта Барселона, оценив состояние системы, нашли то воздействие, которое необходимо было совершить для наиболее эффективного изменения состояния системы (грузооборота порта), а именно целенаправленно инвестировали средства не в сам порт, а в железнодорожную инфраструктуру, чем обеспечили привлекательность и доступность порта для широкого круга грузовладельцев в других регионах страны. Вряд ли такой эффект был бы достигнут при другом воздействии на систему, например, строительстве дополнительных причалов или приобретении нового перегрузочного оборудования.

Точки бифуркации (порт Санкт-Петербург). Примером могут служить два момента в истории развития порта Санкт Петербург:

Первый момент связан с постановлением в 1721 г. Сената Российской Империи о концентрации экспортных грузов в порту Санкт-Петербург, которое обеспечило лидерство Санкт-Петербурга как ведущего порта Российской империи на ближайшее столетие. Становление Петербургского порта происходило в обстановке острой конкуренции с главным в то время портом России – Архангельским портом. Состояние торговли в 1716 – 1719 гг. отражено в табл. 1 [15].

Таблица 1

Грузооборот портов в 1716 – 1719 гг., (тыс. пудов)

Годы	Архангельск	Санкт-Петербург
1716	208	33
1717	146	51
1718	116	54
1719	119	33

По окончании Северной войны Петр I дал указание Сенату разработать указ о концентрации экспортных товаров в Петербурге. В результате кипучая торговая деятельность Архангельской городской биржи сменилась затишьем, что отмечено в табл. 2 [15].

Таблица 2

Грузооборот портов в 1722 – 1725 гг. (тыс. пудов)

Годы	Архангельск	Санкт-Петербург
1722	60	119
1724	22	240
1725	19	236

Второй момент связан с историческим решением, которое было принято в середине XIX в., о строительстве Морского канала в порту Санкт-Петербург, и обеспечившим лидерство этому порту среди Балтийских российских портов до 1917 г. и далее. К середине XIX в., с увеличением числа судов, заходящих в порт Санкт-Петербург, стало практически невозможно обрабатывать суда на Стрелке Васильевского острова — все труднее было производить погрузочно-разгрузочные операции на сравнительно небольших площадках. С ростом размерений судов, а также после постройки моста в нижнем течении Невы (вначале понтонного, а позже и постоянного), продвижение судов к Стрелке Васильевского острова стало совсем затруднительным. Суда в большинстве случаев уже не могли следовать через бары рукавов Невы. Это обстоятельство потребовало создания дополнительной перевалочной площадки в Кронштадте. Суда со значительной осадкой подходили к Кронштадтским причалам, где грузы перегружались на лихтеры, которые доставляли экспортные товары в Петербург. Суда уходили из Петербурга в Кронштадт с недогрузом, куда дополнительный груз доставлялся баржами. Глубина на Невском баре не превышала 3 м, а при низкой воде доходила до 2,5 м. Из 2600 судов, ежегодно прибывающих в то время в Кронштадт, не более половины могли пройти Невский бар. Остальные суда, перевозящие более двух третей всего груза, из-за значительных размерений были вынуждены останавливаться в Кронштадте и перегружать товар на баржи. Такая организация доставки товаров приводила к дополнительным затратам из-за двойной перегрузки, порче и утрате товаров (к примеру, при перегрузках и перевозках угля таким способом терялось 4 – 8 % его объема) [16].

В этот период у порта Санкт-Петербург были серьезные конкуренты. Для иллюстрации конкурентной ситуации на рис. 11, а приведены статистические данные одного из десятилетий (1865 – 1874), являющегося достаточно показательным. В последние годы указанного десятилетия наблюдалось снижение грузопотока через Санкт-Петербург. Отпуск товаров (экспорт) из России в Европу через Петербург понизился с 28 % до 20,9 %, а ввоз (импорт) — с 43,6 % до 27,7 % [15].

Во избежание лишних перегрузок товары стали выгружаться в портах Ревеле (Таллине) и Нарве, а затем уже по Балтийской железной дороге направлялись вглубь России. Так, если до 1868 г. в порту Ревеля разгружалось товаров на сумму от 600 до 800 тыс. руб., то начиная с 1869 г., динамика (в млн руб.) была такова: 1869 г. — 1,4; 1870 г. — 3,6; 1871 г. — 13,7; 1872 г. — 32,6; 1873 г. — 21,1; 1874 г. — 40,6. Аналогичная картина наблюдалась и в Нарвском порту, грузооборот которого за этот же период вырос с 1,5 до 4,0 млн руб. (см. рис. 11, б) [15]. Таким образом, существовал выбор между тремя портами: Санкт-Петербург, Ревель и Нарва.

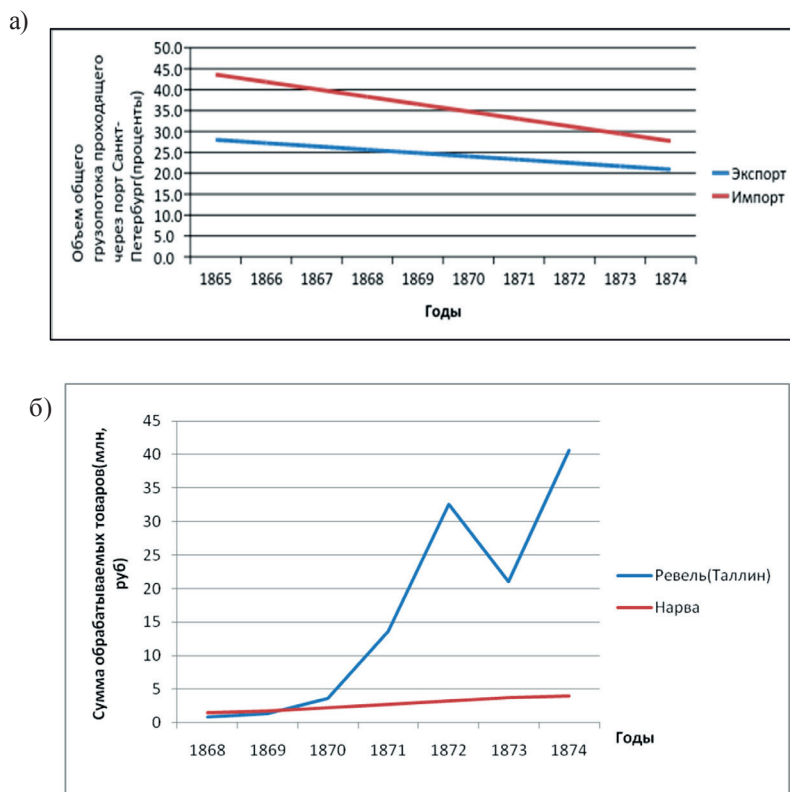


Рис. 11. Динамика грузопотоков, проходящих через порт Санкт-Петербург в 1865 – 1874 гг. (а) и порты Ревель и Нарва в 1868 – 1874 гг. (б)

После принятия решения в пользу порта Санкт-Петербург начались дноуглубительные работы, и в 1885 г. было закончено создание Морского канала от о. Котлин до устья Невы. В устье Невы также были проведены масштабные дноуглубительные работы, что привело к образованию трех гаваней. Небольшой бассейн у начала расхождения дамб канала («Морская пристань») и таможенная гавань при входе в канал из Невы («Гутуевский порт») были созданы в 1885 г.

Третья гавань, служащая для отгрузки за границу лесных товаров и зерновых культур, была образована в период 1897 – 1907 гг. и получила название «Хлебная-Лесная» [16] (рис. 12). Таким образом, была закреплена позиция порта Санкт-Петербург как ведущего Российского порта на Балтийском море.

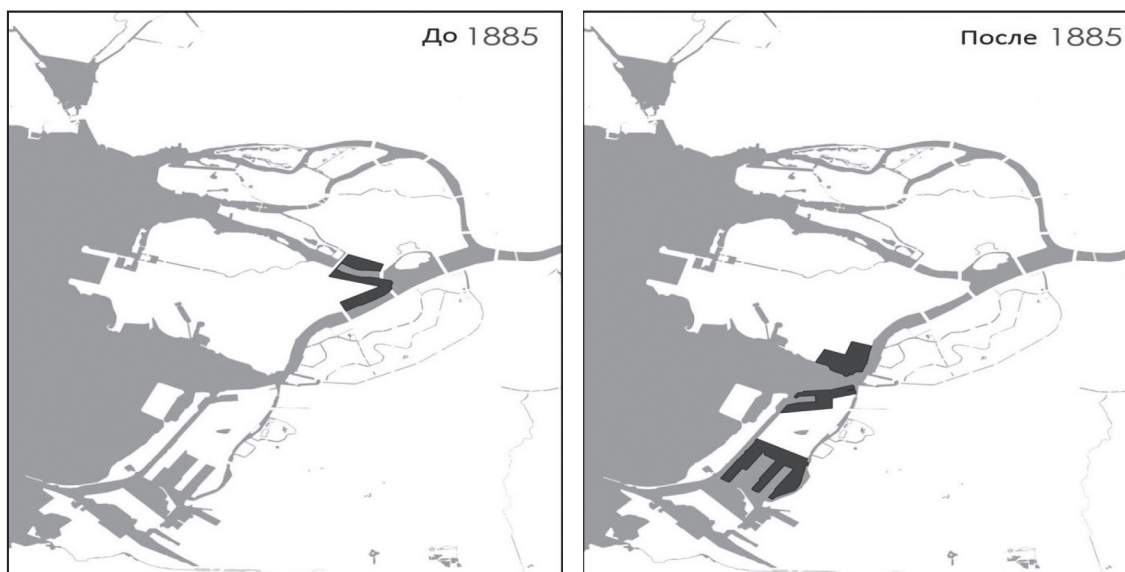


Рис. 12. Схема развития порта Санкт-Петербург

Выводы

1. В современной транспортной науке для изучения принципов управления развития портовыми комплексами сформировалась явная потребность перехода к более мощной методологически синергетической парадигме.

2. Суть синергетического управления состоит во взгляде на указанной комплекс как сложную нелинейную систему, способную к самоорганизации, спонтанному изменению структуры, различию откликов на воздействия, совпадающие и противодействующие существующим внутренним тенденциям саморазвития этой системы.

3. Основываясь на синергетической идее существования «поля путей развития, спектра структур, потенциально содержащегося, скрытого в нелинейных средах» и роли человека в мире, можно утверждать следующее: *поскольку всякое развитие многовариантно, всегда имеется выбор оптимального пути развития, который возможно не только выбрать, но и управлять им. Количество путей развития может быть велико, но не бесконечно, и всегда можно пытаться установить ограничение конкретной системы, сужающее пространство поиска оптимальных.*

4. Имеется принципиальная возможность исследовать оптимальные и осуществимые в рамках имеющихся возможностей сценарии развертывания событий, а также предполагаемые механизмы их реализации.

5. Зная будущее желательное состояние и способы следования естественным тенденциям самоорганизации систем, можно сократить время выхода на аттрактор, или будущую форму организации.

6. Следуя представлениям синергетики, порты и транспортно-логистическая среда должны рассматриваться как сверхсложная самоорганизующаяся, открытая, нелинейная система, со всеми присущими ей свойствами, законами и принципами развития. Портовые процессы реорганизации и развития следует не просто строить и даже не перестраивать, а инициировать, выводить соответствующие системы на собственные линии развития.

7. В то же время все модели должны не просто служить новой мировоззренческой платформой для лиц, принимающих решения, а носить предметный, численный характер, делающий их реальным инструментом планирования развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г. — М.: Росморпорт, 2012. — 170 с.
2. Bird J. Seaports and Seaport Terminals / J. Bird. — London: Hutchinson University Library, 1980. — 117 p.
3. Notteboom T. E. Port regionalization: towards a new phase in port development / T. E. Notteboom, J. P. Rodrigue // Maritime Policy & Management. — 2005. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 297–313. DOI: 10.1080/03088830500139885.
4. 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.
5. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
6. Port marketing and the challenge of the third generation port. — Geneva: UNCTAD, 1992. — 55 p.
7. 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.
8. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным явлениям / Г. Хакен. — М.: Мир, 1991. — 240 с.
9. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. — Ижевск: ИКИ, 2003. — 320 с.
10. Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / И. Пригожин, Г. Николис. — М.: Мир, 1979. — 512 с.

11. Кузнецов А. Л. Кибернетический метод управления развитием морских портов/ А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 3. — С. 93–97.
12. Всемирная история экономической мысли: в шести томах. — М.: Мысль, 1988–1990. — Т. 2: От Смита и Рикардо до Маркса и Энгельса / А. В. Аникин, В. С. Афанасьев, С. З. Бубликов [и др.]; под ред. Л. Н. Сперанской и др. — 576 с.
13. Review of Maritime Transport 2015. — USA, New York: UNCTAD, 2015. — 122 p.
14. Van den Berg R. Hinterland strategies of port authorities: A case study of the port of Barcelona / R. Van den Berg, P. W. De Langen // Research in Transportation Economics. — 2011. — Vol. 33. — Is. 1. — Pp. 6–14. DOI: 10.1016/j.retrec.2011.08.002.
15. Месняков А. Л. История города. — СПб.: Изд-во «Александр Принт», 2002. — 304 с.
16. Кузнецов А. Л. Пространственное развитие портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Инновации. — 2015. — № 2 (208). — С. 115–120.

THE SYNERGY AS THE METHODOLOGICAL APPROACH FOR THE BASICAL INFRASTRUCTURE OF PORT-ORIENTED LOGISTICS

Based on the analysis of existing theory of the port development prediction and control was found the contrariety between existing models and requirements of practice. Historically formed toolkit detail briefed in previous publications of the authors and summarize in this article does not answer to the strategic question of the decision-makers about development program of exact port. Existing models explain in details why the port was developed on a particular way without explanations of the exact directions for future development. Due to the nature of studying subject it is impossible to create a single model of the process of port development using the traditional methodological principles, above question is postulated in the article. Since the modern port is a complex, stepwise, multi-level dynamic system, it cannot be adequately mapped using traditional linear system, which is the methodological simplification of reality. As a result, the port models constructed within the linear paradigm suffer significant loss of properties that initially limits the scope of their applicability. To study the strategic characteristics of ports development, especially included in the associated spatial-economic clusters, it is convenient to use well established in other fields of knowledge. The principal task of the authors was not the transfer of the general provisions of this theory and the creation of a methodological concept which is already used in transport business, but getting specific models of development, focused on the study of the qualitative and quantitative characteristics of the studied objects. It is shown the results of modeling the interaction and evolution of port populations serving the hinterland, the results confirmed the theoretical assumptions and the possibility of achieving stated goals.

Keywords : port, models, logistics, synergy, hinterland.

REFERENCES

1. Strategija razvitija morskoy portovoj infrastruktury Rossii do 2030 g. M.: Rosmorport, 2012.
2. Bird, J. *Seaports and Seaport Terminals*. London: Hutchinson University Library, 1980.
3. Notteboom, Theo E., and Jean-Paul Rodrigue. "Port regionalization: towards a new phase in port development." *Maritime Policy & Management* 32.3 (2005): 297–313. DOI: 10.1080/03088830500139885.
4. 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.
5. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
6. *Port marketing and the challenge of the third generation port*. Geneva: UNCTAD, 1992.
7. 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.
8. Haken, G. *Informacija i samoorganizacija. Makroskopicheskiy podhod k slozhnym javlenijam*. M.: Mir, 1991.
9. Haken, G. *Tajny prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodejstvii*. Izhevsk: IKI, 2003.
10. Prigozhin, I., and G. Nikolis. *Samoorganizacija v neravnovesnyh sistemah: ot dissipativnyh struktur k uporyadochenosti cherez fluktuacii*. M.: Mir, 1979.

11. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. "Cybernetic method of management of development of sea ports." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2016): 93–97.
12. Anikin, A. V., V. S. Afanasev, S. Z. Bublikov, et al. "Ot Smita i Rikardo do Marksa i Jengel'sa." *Vsemirnaja istorija jekonomicheskoj mysli*. M.: Mysl, 1988–1990. Vol. 2. 560–566.
13. *Review of Maritime Transport 2015*. USA, New York: UNCTAD, 2015.
14. Van den Berg, Roy, and Peter W. De Langen. "Hinterland strategies of port authorities: A case study of the port of Barcelona." *Research in Transportation Economics* 33.1 (2011): 6–14. DOI: 10.1016/j.retrec.2011.08.002.
15. Mesnjakov, A. L. *Istorija goroda*. SPb.: Izdatelstvo Aleksandr Print, 2002.
16. Kuznezov, A. L., and A. V. Galin. "Spatial development of ports." *Innovations* 2(208) (2015): 115–120.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
thunder1950@yandex.ru
Галин Александр Валентинович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
galin2403@gmail.com
Кириченко Александр Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
a.v.kirichenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Aleksandr Lvovic —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
thunder1950@yandex.ru
Galin Aleksandr Valentinovic —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
galin2403@gmail.com
Kirichenko Aleksandr Viktorovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
a.v.kirichenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42
УДК 655.62.052.4

**А. А. Ершов,
П. И. Петухов**

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СПРЯМЛЕНИЮ СУДНА ПРИ АВАРИИ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

В статье рассматриваются способы реализации требований Международного полярного кодекса, который вступает в силу с 1 января 2017 г. Ключевым требованием для выполнения требований Международного полярного кодекса является Свидетельство судна полярного плавания, для получения которого для каждого судна должны быть разработаны «Наставления по эксплуатации судов в полярных водах». При создании данного документа необходимо разработать рекомендации по борьбе за живучесть конкретного судна при получении им повреждений в условиях ледового плавания. В настоящей статье для разработки данных рекомендаций предлагается использовать методы спрямления судна с извлечением полученной пробоины из воды. Предложенные в статье методы спрямления позволяют использовать их на всех судах, осуществляющих ледовое плавание в полярных водах, обеспечивая тем самым выполнение двух важнейших задач: быстрое, самостоятельное спрямление судна и предотвращение дальнейшего поступления воды через пробоину, а также снижение вероятности экологического загрязнения в процессе проведения этих мероприятий за счет предотвращения или снижения вероятности поступления в воду загрязненных веществ из корпуса судна. На основании результатов расчетов, предложенным в настоящей работе, сделан вывод об эффективности спрямления судна с извлечением пробоины из воды, а также подтверждена возможность использования данного метода на существующих и перспективных судах ледового плавания.

Показано, что применение данного метода позволит не только выполнить требования Международного полярного кодекса, но и обеспечить безопасное плавание судов в ледовых условиях. В статье показано, что методы спрямления судна с извлечением пробоины из воды могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов по плаванию в различных ледовых условиях. Они могут быть предложены мировому морскому сообществу как основной метод для решения вопросов борьбы за живучесть в условиях ледового плавания, разработки рекомендаций для судов различных типов и конструкций, при подготовке судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.

Ключевые слова: Международный полярный кодекс, ледовое плавание судов, борьба за живучесть в условиях ледового плавания, спрямление судна с извлечением пробоины из воды.

Введение

В настоящее время безопасность плавания в полярных водах регулируется основными конвенциями в этой области: Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74), Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78), Международной конвенцией о Грузовой марке и др., а аспекты предотвращения загрязнения — Международными конвенциями МАРПОЛ 73/78 и конвенцией о контроле за вредными противообрастающими системами на судах. Ожидается вступление в силу Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими.

С 1 января 2017 г. международное судоходство, в дополнение к указанным конвенциям, должно отвечать требованиям «Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах» (МПК) [1], являющегося обязательным в соответствии с конвенциями СОЛАС-74 и МАРПОЛ 73/78 [2]–[4]. Требования МПК к безопасности не распространяются на суда, совершающие рейсы между портами только Российской Федерации, такие суда являются предметом Кодекса торгового мореплавания РФ (далее — КТМ) и иных применимых отечественных нормативно-правовых документов.

Плавание судов в акватории Северного морского пути (СМП) регулируется «Правилами плавания», введенными Приказом Минтранса России от 17.01.2013 г. № 7 (ППСМП) [5]. Применение ППСМП предусматривает предоставления разрешения на плавание в акватории СМП на основании заявок, подтверждающих техническую подготовку судна к плаванию, готовность экипажа и характер перевозимого груза.

С вводом в действие МПК в состав документов, внесенных в заявку, в общем случае надлежит включить Свидетельство судна полярного плавания (ССПП) и Наставления по эксплуатации судов в полярных водах (НЭПВ), на основании которых Администрация СМП (АСМП) будет выносить решения о выдаче или отклонении разрешений на плавание в акватории СМП.

Реализация требований МПК, включая разработку НЭПВ, обеспечивает переход к новым процедурам обеспечения безопасности и предотвращения загрязнения в полярных водах, предписываемым МПК [6].

Основная часть

В МПК имеется инструкция о разработке НЭПВ, в которую включено подробное изложение требований к различным разделам, составляющим его содержание. Так, разд. 2.1. «Борьба за живучесть» гл. 2. «Реагирование на чрезвычайные ситуации» содержит следующие рекомендации: «НЭПВ должно рассматривать меры и устройства по борьбе за живучесть для аварийной передачи жидкостей и обеспечения доступа к танкам и помещениям в ходе спасательных операций» [1, с. 60].

Таким образом, меры, предусматриваемые НЭПВ, должны давать возможность использования танков судна для снижения опасностей повреждения. При этом следует учитывать необходимость быстрого и самостоятельного решения задачи борьбы за живучесть конкретного судна

в полярных водах, так как быстрой и эффективной помощи в ледовых условиях можно дожидаться далеко не всегда. Кроме того, должна обеспечиваться максимальная экологическая безопасность предлагаемых мероприятий, так как принцип «нулевого сброса» в полярных водах [1], очевидно, должен относиться к борьбе за живучесть судна в условиях ледовых повреждений. Для соблюдения этих требований в качестве основного принципа борьбы за живучесть в случае нарушения водонепроницаемости при ледовых повреждениях предлагается спрямление судна с извлечением полученной пробоины из воды. Такими действиями достигается решение двух основных задач, на которые направлен МПК: предотвращение гибели судна в полярных водах и снижение опасности экологического загрязнения при ледовых авариях. Этот принцип использован в работах [6], [7]. На рис. 1 – 3 в графическом виде представлены дополнительные преимущества данного вида борьбы за живучесть, к которым относятся:

- возможность использования при основных видах ледовых аварий, связанных с повреждением корпуса судна. Пробоина при ледовых повреждениях в абсолютном большинстве случаев располагается в районе ватерлинии, что требует незначительного крена судна для ее извлечения из воды (рис. 1, а);
- возможность быстрого реагирования на аварию путем использования для перекачки заранее определенных танков судна, в перспективе возможность использования в автоматизированном (автоматическом) режиме креновой системы судна (рис. 1, б);
- возможность предотвращения поступления забортной воды через пробоину. Снижение опасности экологического загрязнения. Возможность безопасного продолжения спасательных и ремонтных операций (рис. 1, в).

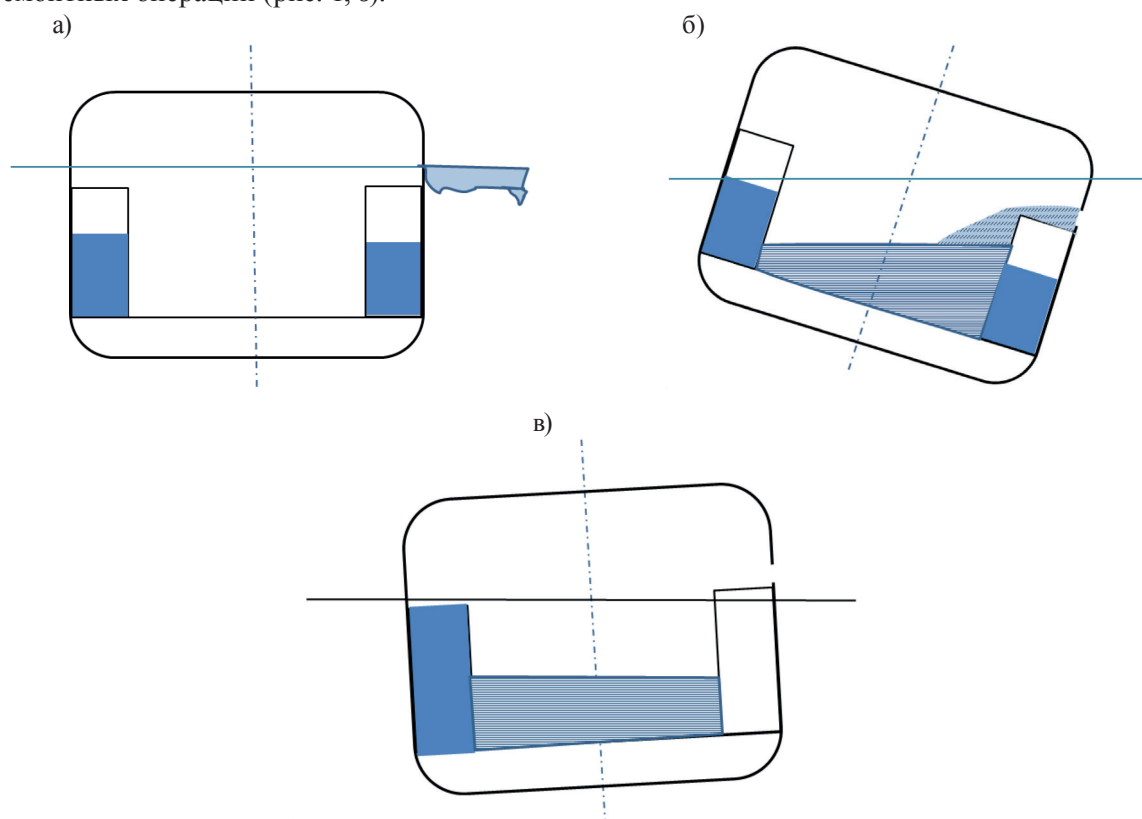


Рис. 1. Преимущества спрямления судна с извлечением пробоины из воды:

- а — возможность использования при основных видах ледовых аварий; б — возможность быстрого реагирования на аварию путем использования для перекачки заранее определенных танков судна; в — возможность предотвращения поступления забортной воды через пробоину

Указанные преимущества, а также возможность использования для данного метода судовой информации об остойчивости и аварийной остойчивости дают возможность рекомендовать его

отечественным и иностранным судам в качестве основного метода борьбы за живучесть судна при ледовых авариях.

Рекомендации по борьбе за живучесть для использования в НЭПВ могут включать следующие элементы: типовые случаи затопления отсеков конкретного судна, расчет остойчивости и способы спрямления судна с извлечением пробойны из воды в каждом из типовых случаев.

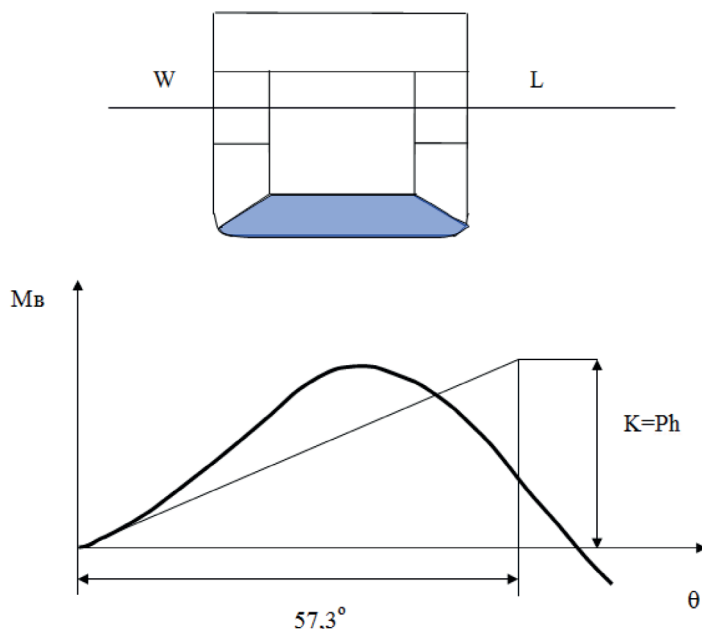


Рис. 2. Затопление помещений судна в первом типовом случае

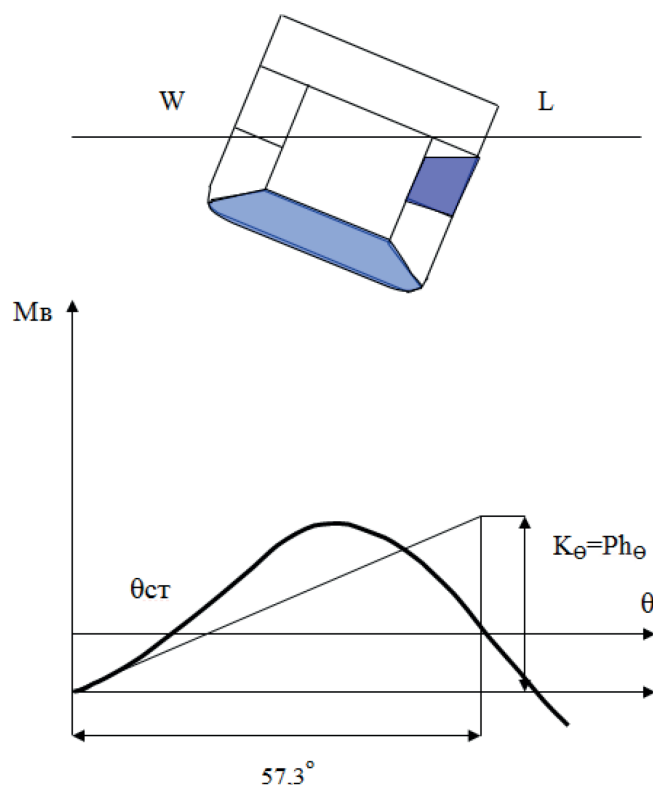


Рис. 3. Затопление помещений судна во втором типовом случае

Первый типовой случай затопления помещений судна (рис. 2) характеризуется тем, что вода полностью заполняет отсеки, расположенные ниже ватерлинии. Крен судна не образуется. Остойчивость судна повышается. Спрявление не требуется. Извлечение пробойны из воды достигается за счет намеренного создания крена на противоположный борт судна.

Второй типовой случай затопления помещений судна (рис. 3 и 4). Судно имеет крен в сторону пробойны. Остойчивость судна положительна. Извлечение пробойны из воды достигается за счет ликвидации крена судна (спрямления судна) и намеренного создания крена на противоположный борт. В процессе спрямления рекомендуется создавать спрямляющий момент за счет перекачки воды в танки, создающие наименьшую свободную поверхность и расположенные как можно ближе к днищу для сохранения остойчивости судна.

Коэффициенты поперечной остойчивости судна после попадания воды внутрь корпуса судна при получении пробойны и после начала спрямления судна определяются следующим образом [8]:

$$K_\Theta = Ph_\Theta = (\Delta + m_{зв}) h_\Theta; K = (\Delta + m_{зв}) h_1, \quad (1)$$

где Δ — водоизмещение судна до аварии, т;

$m_{зв}$ — масса забортной воды, поступившей внутрь корпуса судна через пробойну, т;

h_Θ — начальная поперечная метацентрическая высота судна после получения пробойны, м;

h_1 — начальная поперечная метацентрическая высота после начала спрямления судна, м.

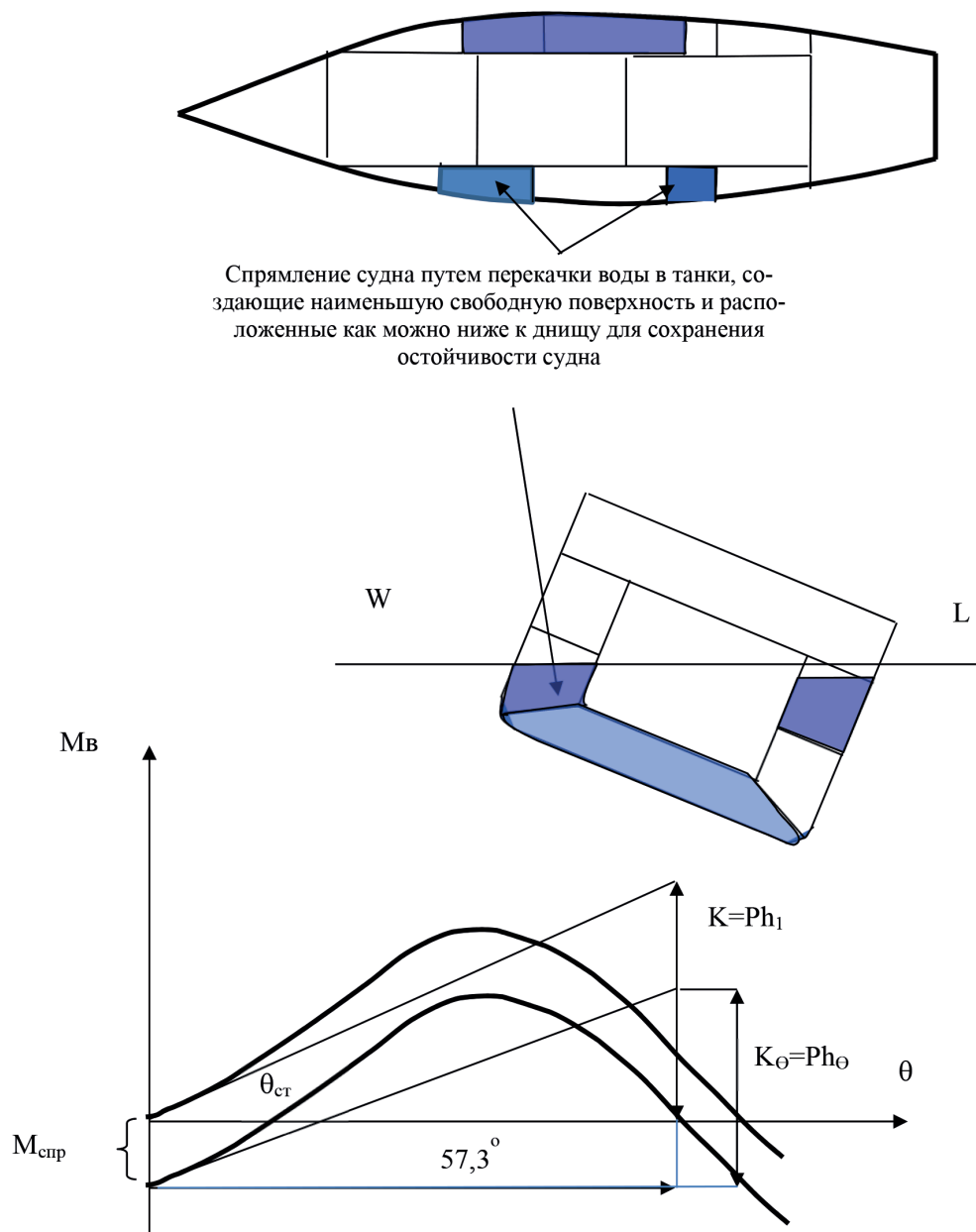


Рис. 4. Спрямление судна во втором типовом случае

Для определения начальной метацентрической высоты после получения пробоины судна может быть использовано следующее выражение [8]:

$$h_{\Theta} = h + m_{3B} / (\Delta + m_{3B}) (d + \delta d / 2 - z - h) - \rho i_x / (\Delta + m_{3B}), \quad (2)$$

где h — начальная поперечная метацентрическая высота судна до получения пробоины, м; d — средняя осадка судна до получения пробоины, м; δd — приращение осадки вследствие поступления забортной воды через пробоину, м; z — возвышение центра тяжести поступившей в корпус судна забортной воды над основной плоскостью судна, м; i_x — момент инерции площади свободной поверхности, поступившей в корпус судна забортной воды относительно оси x , м⁴; ρ — плотность забортной воды, т/м³.

После начала спрямления судна, после перекачки жидкости с одного борта на другой, начальная метацентрическая высота судна может быть определена как

$$h_1 = h_{\Theta} - \Sigma i_{x1} \rho / (\Delta + m_{3B}) - \Sigma i_{x2} \rho / (\Delta + m_{3B}), \quad (3)$$

где Σi_{x1} — суммарный момент инерции площадей свободной поверхности воды танков или цистерн, откуда началась перекачка воды для спрямления судна, m^4 ; Σi_{x2} — суммарный момент инерции площадей свободной поверхности воды танков или цистерн, куда началась перекачка воды для спрямления судна, m^4 .

В том случае, если танки или цистерны, используемые для спрямления, уже имеют свободные поверхности, которые учтены в расчетах остойчивости судна, с учетом малости m_{3B} по сравнению с водоизмещением судна Δ , выражение (3) преобразуется к виду

$$h_1 = h_0. \quad (4)$$

Для определения массы воды, необходимой для перекачки для спрямления судна после получения пробоины, может быть использовано следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \Theta = 2h_n / B = \Sigma m(y_2 - y_1) / (h_1 \Delta), \quad (5)$$

где h_n — толщина льда, который может стать причиной пробоины в условиях ледового плавания, м; B — ширина судна, м; $\Sigma m(y_2 - y_1) = M_{\text{спр}}$ — спрямляющий момент от перекачки жидкостей с одного борта на другой, т·м.

Если центры тяжести танков, используемых для спрямления расположены на одинаковом расстоянии, т. е. $(y_2 - y_1) = \text{const}$, то из выражения (5) может быть получена суммарная масса жидкости, необходимая для перекачки с одного борта на другой при спрямлении судна:

$$\Sigma m = 2h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1). \quad (6)$$

В случае, если необходимо гарантированное извлечение пробоины из воды, величина m может быть увеличена в 2 – 3 раза:

$$\Sigma m = 4h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1) \quad (7)$$

или

$$\Sigma m = 6h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1), \quad (8)$$

Для иллюстрации расчета величины Σm по выражениям (6) – (8) рассмотрим пример расчета спрямления судна с извлечением пробоины из воды при следующих условиях: водоизмещение судна: $\Delta = 10000$ т; толщина льда, который стал причиной пробоины в условиях ледового плавания: $h_n = 0,5$ м; ширина судна $B = 25$ м; расстояние между танками, используемыми для спрямления судна: $(y_2 - y_1) = 20$ м; исправленное значение начальной метацентрической высоты судна $h_1 = 0,5$ м.

В соответствии с формулой (6) значение массы жидкости, необходимое для спрямления судна, которое должно быть перекачено с борта на борт, может быть рассчитано в виде

$$\Sigma m = 2h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1) = 2 \cdot 0,5 / 25 \cdot 0,5 \cdot 10000 / 20 = 10 \text{ т.} \quad (9)$$

В соответствии с формулой (7) необходимое для спрямления судна с извлечением пробоины из воды значение массы жидкости, которое должно быть перекачено с борта на борт, может быть рассчитано следующим образом:

$$\Sigma m = 4h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1) = 4 \cdot 0,5 / 25 \cdot 0,5 \cdot 10000 / 20 = 20 \text{ т.} \quad (10)$$

В соответствии с формулой (8) необходимое для спрямления судна с повышенным извлечением пробоины из воды значение массы жидкости, которое должно быть перекачено с борта на борт, может быть получено как

$$\Sigma m = 6h_n / B h_1 \Delta / (y_2 - y_1) = 6 \cdot 0,5 / 25 \cdot 0,5 \cdot 10000 / 20 = 30 \text{ т.} \quad (11)$$

Как следует из указанных численных примеров расчета для спрямления данного расчетного судна с извлечением пробоины из воды, необходимо перекачать с борта на борт $\Sigma m = 10 - 30$ т жидкости. При существующей производительности насосов для перекачки такого количества

жидкости судну потребуется 5 – 15 мин. Таким образом, подтверждается ранее сделанное предположения о скорости и эффективности данного способа спрямления судна. Кроме того, можно утверждать, что при получении ледового повреждения с одного борта судоводитель самостоятельно, без проведения предварительных расчетов, должен дать команду в машинное отделение о запуске насосов на перекачку с одного борта на другой и проконтролировать извлечение пробойны из воды с крыла мостика судна.

Судоводителю следует учитывать возможность появления свободной поверхности во время перекачки балласта с борта на борт, что может краткосрочно уменьшить метацентрическую высоту и привести к большему крену. Не следует останавливаться до полного окончания операции перекачки, так как в конце операции свободная поверхность заполняемого танка будет устранена и её следствие на крен судна нивелируется. Для этой операции потребуется совсем немного времени, но опасность затопления судна и экологического загрязнения будет ликвидирована согласно существующим требованиям МПК [1]. Кроме того, подтверждается ранее сделанное предположение о возможности запуска насосов на спрямление судна с извлечением пробойны из воды в автоматическом режиме после получения информации о повреждении корпуса судна в результате ледового плавания. Опыт произошедших аварий и способов их избежания [9] – [11], подтверждает возможность применения указанных методов в ледовых условиях.

Выводы

1. Использование спрямления судна с извлечением пробойны из воды в случае получения ледовых повреждений, рассмотренного в данной статье, может быть предложено всем судам отечественных и иностранных судоходных компаний как основного метода борьбы за живучесть, удовлетворяющего требованиям Международного полярного кодекса.

2. Рассмотрены основные преимущества данного метода, которые заключаются в том, что он может быть использован при всех видах ледовых повреждений, не требует больших временных или иных затрат, может самостоятельно выполняться на любом судне при перекачке жидкости с одного борта, способствует быстрой ликвидации опасности затопления судна и экологических загрязнений.

3. Получены расчётные зависимости и приведены численные примеры, которые подтвердили преимущества предлагаемого метода и могут быть использованы при проведении оперативных расчетов на судах, совершающих плавание в полярных водах.

4. Судоводители всего мира уже в настоящее время могут использовать данный метод при получении пробойны путем подачи команды в машинное отделение на перекачку жидкости на противоположный борт и визуальном контроле выхода пробойны из воды при ледовых авариях.

5. В перспективе данный метод спрямления судна при ледовых авариях может использоваться в автоматическом режиме после получения информации с использованием датчиков о повреждении корпуса судна в результате ледового плавания.

6. Следует учитывать, что после операции по спрямлению судна с извлечением пробойны из воды необходимо как можно скорее связаться с государственными структурами оказания помощи и спасения для их информирования и вызова необходимой помощи, как это предусмотрено МПК [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). Резолюция ИМО MSC.385(94). — 2014.
2. Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками. Резолюция ИМО MSC.386(94). — 2014.
3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС-74).

4. Международная конвенция о предотвращении загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 г. к ней с поправками (МАРПОЛ 73/78).
5. Правила плавания в акватории Северного морского пути / Утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013 г. № 7.
6. Ершов А. А. Рекомендации по маневрированию судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, С. Ю. Развозов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016- 8-5-20-29.
7. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.
8. Ершов А. А. Теория судна. Статика: учеб. пособие / А. А. Ершов, Б. П. Коротков [и др.]. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 186 с.
9. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
10. 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.
11. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.

RECOMMENDATIONS TO STRAIGHTEN THE SHIP IN THE ACCIDENT IN ICE CONDITIONS

The article discusses ways of implementing the requirements of the International Polar code, which comes into force on 1 January 2017. The main requirement to the requirements of the International polar code-getting evidence of the ship's Arctic voyage, for which each ship should be developed guidelines for the operation of ships in polar waters. The creation of this document should develop recommendations to control the state of the vessel from damage in conditions of ice navigation. In this article to create these recommendations, it is proposed to use the methods to straighten the ship with the rise holes out of the water. The methods proposed in this paper, can be used for all ships for polar waters for solving two important tasks: quickly straighten of the vessel, prevent further entry of water through the holes and reducing the chances of environmental pollution. Based on the results of the calculations proposed in this work, the conclusion about the effectiveness of the straightening the ship with the rise of holes from the water and confirmed the possibility of using this method on existing and future ships of ice navigation. It is shown that the use of this method allows not only to observe International polar Code, as well as to ensure safe navigation of ships in ice conditions. The article shows that the methods can be used to develop practical recommendations for vessels of various types and designs of navigation in different ice conditions. They can be offered in advance of the marine community in the world as the primary method for solving problems of the struggle for survival in conditions of ice navigation, design guidelines for various types of vessels and compositions in the preparation of skippers to sail in a particular ice conditions.

Keywords: International Polar code, navigation in polar waters, the struggle for survival in conditions of ice navigation, straightening of the vessel with the rise of holes out of water.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnyj kodeks dlja sudov, jekspluatirujushhihsja v poljarnyh vodah. Rezoljucija IMO MSC.385(94). 2014.
2. Поправки к Международной конвенции по охране человеческого зжизни на more 1974 goda. Rezoljucija IMO MSC.386(94). 2014.
3. Mezhdunarodnaja Konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74) s popravkami.
4. Mezhdunarodnaja konvencija o predotvrashhenii zagrjaznenija s sudov 1973 goda, izmenennaja protokolom 1978 g. k nej s popravkami (МАРПОЛ 73/78).

5. Russian Federation. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 17.01.2013 № 7. Pravila plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti.
6. Ershov, Andrey Alexandrovich, Sergey Jrevich Razvozov, and Pavel Igorevich Petuhov. "Recommendation on maneuvering the vessel in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-20-29.
7. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov. Dr. diss. SPb., 2012.
8. Ershov, A. A., B. P. Korotkov, et al. *Teorija sudna. Statika: uchebnoe posobie*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
9. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spa-senija: monografija*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
10. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
11. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. "Breaking the Ice: Navigation in the Arctic." *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru
Петухов Павел Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sevarus89@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov Andrey Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ershov_63@mail.ru
Petuhov Pavel Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Ershov Andrey Alexandrovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sevarus89@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-42-57
УДК 629.123.56

**И. И. Костылев,
Г. П. Евдокимов**

РАЗВИТИЕ ГАЗОВОЗОВ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ В НЕМ МИРОВОГО РЫНКА. РОССИЙСКИЕ ПРОЕКТЫ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Показаны запасы, экспорт и импорт природного газа по странам в соответствии с последними данными. Приведены данные о мировых перевозках сжиженного природного газа. Показана структура мирового флота и освещено развитие газозов СПГ. Рассмотрено развитие энергетических установок газозов. Представлены газозовы, предназначенные для длительной эксплуатации при низких температурах и в ледовых условиях. Отмечается, что первое место в мире по размеру флота газозовов с высоким ледовым классом занимает греческая компания Dypnagas, ее газозов «Ob River» первым прошел по Северному морскому пути. Представлены газозовы с установками регазификации. Рассмотрены российские проекты СПГ, развиваемые ПАО «Газпром»: «Сахалин- 2», «Балтийский СПГ», «Владивосток СПГ» и регазификационный терминал в Калининградской области. Приведена информация о проектах «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ», развиваемых ОАО «НОВАТЭК». Отражено развитие СПГ-проектов ПАО «НК «Роснефть».

Показан флот судов-газовозов российского ПАО «Совкомфлот», для которого спущен на воду головной газовоз по проекту «Ямал СПГ». Отмечается, что развитие газовозного флота стимулируется освоением новых месторождений и расширением добычи на уже действующих. Рынок СПГ разделяется преимущественно на бассейны, в пределах которых ведется добыча природного газа. Прежде всего, это Тихоокеанский и Атлантический бассейны. Наиболее объемным по количеству поставляемого газа является регион Среднего Востока.

В статье анализируется информация по странам-экспортерам газа, что в значительной степени предопределяет возможные направления её транспортировки. Наибольшими запасами природного газа обладают Иран, Россия, Катар, Туркменистан и страны Ближнего Востока. Однако отмечается, что объем добываемого газа не всегда свидетельствует о его экспорте. Например, Саудовская Аравия и Иран основную часть своего газа потребляют внутри страны.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, перевозки, газовозы, энергетические установки, российские проекты СПГ.

Распределение запасов и экспорт природного газа по странам

Природный газ — самое экологически чистое ископаемое топливо, которое обладает наивысшей энергетической ценностью. Поэтому спрос на него постоянно растет [1]. Так, в 2000 г. мировое потребление природного газа составило 2 411 млрд куб. м, в 2010 г. — 3 180 млрд куб. м, а в 2015 г. — 3 468 млрд куб. м. Таким образом, в XXI в. рост потребления природного газа в среднем составил 2,9 % в год.

Наибольшими запасами природного газа обладают такие страны, как Иран, Россия, Катар, Туркменистан, США, Саудовская Аравия, Объединённые Арабские Эмираты, Венесуэла, Нигерия и Алжир. Максимальное количество газа производят США (с учётом сланцевого газа), Россия, Иран, Катар, Канада, Китай, Норвегия, Саудовская Аравия, Алжир, Индонезия. Однако не все страны, добывающие газ в больших объемах, его экспортируют. Например, Саудовская Аравия потребляет весь добываемый газ, Иран — почти весь добываемый газ, а Китай еще его и импортирует. Страны, обладающие наибольшими запасами природного газа, с соответствующими его доказанными запасами, производством и экспортом [2] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Страны, обладающие наибольшими запасами природного газа по данным на конец 2015 г.

Регион, страна	Запасы, трлн куб. м	Производство, млрд куб. м	Экспорт СПГ, млрд куб. м	Экспорт по трубопроводу, млрд куб. м
Средний Восток, <i>всего</i>	80,0	617,9	126,2	28,2
в том числе				
Иран	34,0	192,5	—	8,4
Йемен	0,3	2,7	2,0	—
Катар	24,5	181,4	106,4	19,8
ОАЭ	6,1	55,8	7,6	—
Оман	0,7	34,9	10,2	—
Саудовская Аравия	8,3	106,4	—	—
АТР, <i>всего</i>	15,6	556,7	115,2	31,6
В том числе				
Австралия	3,5	67,1	39,8	—
Бруней	0,3	12,7	8,7	—
Вьетнам	0,6	10,7	—	—

Таблица 1
(Окончание)

Индия	1,5	29,2	—	—
Индонезия	2,8	75,0	21,9	10,5
Китай	3,8	138,0	—	—
Малайзия	1,2	68,2	34,2	—
Мьянма	0,5	19,6	—	13,4
Папуа Новая Гвинея	0,1		9,7	—
Африка, <i>всего</i>	14,1	211,8	16,2	36,1
В том числе				
Алжир	4,5	83,0	16,2	25,0
Египет	1,8	45,6	—	—
Ливия	1,5	12,8	—	6,5
Нигерия	5,1	50,1	27,5	—
Экваториальная Гвинея			5,0	—
Европа и Евразия, <i>всего</i>	56,8	989,9	25,4	456,7
В том числе				
Россия	32,3	573,3	14,5	193,0
Азербайджан	1,1	18,2	—	7,6
Казахстан	0,9	12,4	—	11,3
Туркменистан	17,5	72,4	—	38,1
Узбекистан	1,1	57,7	—	7,5
В том числе				
Великобритания	0,2	39,7	—	13,4
Нидерланды	0,7	43,0	—	40,6
Норвегия	1,9	117,2	6,0	109,5
Северная Америка, <i>всего</i>	12,8	984,0	0,8	124,0
в том числе				
Канада	2,0	163,5	—	74,3
США	10,4	767,3	0,8	49,7
Южная и Центр. Америка, <i>всего</i>	7,6	178,5	22,0	18,5
В том числе				
Боливия	0,3	20,9	—	16,2
Венесуэла	5,6	32,4	—	—
Перу	0,4	12,5	5,0	—
Тринидад и Тобаго	0,3	39,6	17,0	—
<i>Всего в мире</i>	186,9	3538,6	338,3	704,1

Наибольшие объемы природного газа экспортируют такие страны, как Россия, Катар, Норвегия, Канада, США, Алжир, Нидерланды, Австралия, Малайзия, Индонезия.

Международная торговля природным газом в 2015 г. достигла 1 042,4 млрд куб. м. При этом по трубопроводам было транспортировано 704,1 млрд куб. м газа, а в сжиженном состоянии мор-

скими судами — 338,3 млрд куб. м. Видно, что основные объемы природного газа (67,5 и 32,5 %) поставлялись по трубопроводу и морскими судами.

Россия, Норвегия и Великобритания поставляют газ преимущественно по трубопроводу в страны Европы, Канада по трубопроводу поставляет газ в США, США — в Канаду и Мексику. Страны, отстоящие от импортеров на большом удалении с протяжёнными морскими маршрутами доставки, экспортируют газ морскими судами.

На морских судах природный газ перевозится в сжиженном состоянии при атмосферном давлении и сверхнизкой температуре -163°C . Таким образом, сжиженный природный газ (СПГ или LNG — сокр. от Liquefied Natural Gas) — это криогенная жидкость. При этом он занимает примерно 1/600 своего первоначального объема и имеет плотность 420 — 490 кг/м³ [3] и [4]. Перевозки СПГ являются самым динамично развивающимся сегментом мировых морских перевозок.

Мировой рынок перевозок СПГ

Рынок перевозок СПГ разделяется преимущественно на бассейны, в пределах которых природный газ добывается, сжижается, экспортируется и импортируется: на Тихоокеанский и Атлантический, включая Средиземное и Северное моря, а также Средний Восток, экспортирующий СПГ в страны Азии и Европы. Ведущие мировые экспортеры СПГ традиционно расположены в Тихоокеанском бассейне, в его юго-западной части — это Австралия, Малайзия, Индонезия, Папуа Новая Гвинея и Бруней, поставившие на рынок в 2015 г. примерно 34,1 % всего мирового экспорта СПГ.

Наиболее концентрированным по объемам поставок и с 2010 г. крупнейшим мировым экспортёром СПГ является регион Среднего Востока, страны которого Катар, Оман, ОАЭ и Йемен экспортировали 37,3 % мирового экспорта СПГ. Причем Катар в 2006 г. вышел на первое место в мире по объему экспорта, он в настоящее время экспортирует свыше 100 млн куб. м СПГ в год, это в 2,7 раза больше, чем его ближайший конкурент Австралия. В Атлантическом бассейне экспорт СПГ осуществляют страны Западной и Северной Африки: Нигерия, Алжир, Экваториальная Гвинея, страны Центральной и Южной Америки: Тринидад и Тобаго, Перу.

В 2007 г. началось производство СПГ на месторождении Сновит в Норвегии, расположенном за Полярным кругом. Начиная с 2009 г., с вводом в эксплуатацию завода СПГ на Сахалине, крупным экспортёром газа является Россия. СПГ с Сахалина экспортируется в Японию, Южную Корею, Китай и другие страны. Крупнейшими импортёрами СПГ являются: в Тихоокеанском бассейне — Япония, ее доля составляет 35 % в мировом импорте СПГ, а также Южная Корея, Китай, Тайвань и Индия. Доля этих стран в 2015 г. составила 67,5 % мирового импорта СПГ. В Атлантическом бассейне крупными импортерами СПГ являются страны ЕС (Испания, Великобритания, Франция, Италия, Бельгия) и Турция, а по другую сторону океана — Мексика, Бразилия, Аргентина, Чили. Мировой импорт СПГ по странам с соответствующими объемами, согласно данным источника [2], приведен в табл. 2.

Таблица 2

Страны-импортеры СПГ с соответствующими объемами на период конца 2015 г.

Страны	Импорт СПГ, млрд куб. м
АТР, всего	238,6
В том числе Индия	21,7
Китай	26,2
Малайзия	2,2
Пакистан	1,5
Сингапур	3,0

Таблица 2
(Окончание)

Тайвань	18,7
Таиланд	3,6
Южная Корея	43,7
Япония	118,0
Европа и Евразия, <i>всего</i>	55,0
В том числе Бельгия	3,8
Великобритания	12,8
Испания	13,1
Италия	6,0
Франция	6,6
Турция	7,5
Северная Америка, <i>всего</i>	10,3
В том числе США	2,6
Канада	0,6
Мексика	7,1
Южная и Центральная Америка, <i>всего</i>	20,0
В том числе Аргентина	5,8
Бразилия	7,1
Чили	4,2
Средний Восток, <i>всего</i>	10,5
Африка, <i>всего</i>	3,8
Мир в целом	338,3

Развитие судов для перевозки СПГ

В XXI в. наблюдается быстрый рост мирового флота судов для перевозки СПГ. Так, если в 2000 г. в эксплуатации насчитывалось 127 таких судов, в конце 2005 г. — 191 судно, то в начале 2011 г. — 363 судна. На 1 января 2016 г. мировой флот газозовов СПГ включал 443 судна суммарной грузовместимостью 65 млн куб. м, а в портфеле заказов находилось 155 судов суммарной грузовместимостью 24,5 млн куб. м, что составляло 38 % действующего флота. Структура действующего и заказанного флота газозовов СПГ, по данным источника [5], приведена в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Структура мирового флота газозовов СПГ по размерным группам на 01 января 2016 г.

Размерная группа по грузовместимости, куб. м	Количество судов	Суммарная грузовместимость, млн куб. м
Менее 3 000	8	0,0
3 000 – 8 000	3	0,0
8 000 – 12 000	4	0,0

Таблица 3
(Окончание)

12 000 – 22 000	8	0,1
22 000 – 45 000	5	0,1
45 000 – 60 000	–	–
60 000 – 85 000	7	0,5
85 000 – 150 000	226	31,3
150 000 – 200 000	137	22,1
Более 200 000	45	10,3
Итого	443	64,6

Таблица 4

**Структура портфеля заказов мирового флота газозовов СПГ
по размерным группам на 01 января 2016 г.**

Размерная группа по грузопместимости, куб. м	Количество судов	Суммарная грузопместимость, млн куб. м
Менее 3 000	1	0,0
3 000 – 8 000	3	0,0
8 000 – 12 000	–	–
12 000 – 22 000	2	0,0
22 000 – 45 000	7	0,2
45 000 – 60 000	1	0,0
60 000 – 85 000	–	–
85 000 – 150 000	–	–
150 000 – 200 000	141	24,2
Более 200 000	–	–
Итого	155	24,5

Вследствие высокой стоимости срок службы газозовов СПГ рассчитывается на 40 лет. При этом необходимо отметить, что в строю находится большое количество газозовов возрастом до 30 лет и более, которые до сих пор эксплуатируются с первоначально изготовленным корпусом, изначально установленными грузовыми танками, но уже с новыми механизмами и системами контроля и управления.

По экономическим причинам имеет место тенденция увеличения размеров судов, поскольку при этом достигается снижение удельных транспортных расходов, так называемая *экономика масштаба*. Так, в начале 1980-х гг. наиболее распространенный размер заказываемых газозовов СПГ составлял в среднем 125 000 куб. м, начиная со второй половины 1990-х гг. — 138 000 куб. м, с середины 2000-х гг. — 145 000 – 155 000 куб. м, а с 2010-х гг. — уже 170 000 – 180 000 куб. м. Ввод в эксплуатацию в 2007 – 2010 гг. газозовов в рамках реализации долгосрочных поставок СПГ из Катара ознаменовал эру появления газозовов постройки Южной Кореи грузопместимостью 210 000 – 217 000 куб. м (по проекту Q-flex) — головное судно *Al Gattara* и 260 000 – 270 000 куб. м (Q-max) — головное судно *Mozah*. Всего по 2010 г. были построены 31 газозов по проекту Q-flex и 14 газозовов по проекту Q-max.

Скорость газовозов СПГ составляет 19,5 – 21 уз. СПГ перевозится в специальной защитной системе — в грузовых танках, монтируемых в корпусе и выступающих над палубой. Наибольшее распространение получили сферические грузовые танки типа «Moss», разработанные норвежской фирмой Moss Rosenberg, и мембранные грузовые танки, разработанные французской фирмой Gaztransport and Technigaz (GTT). Если на начало 2000-х гг. около 50 % эксплуатируемых газовозов СПГ были оборудованы сферическими танками, то уже начиная с первой половины 2000-х гг. в портфеле заказов судостроительных верфей превалировали газовозы с мембранными грузовыми танками и на конец 2015 г. мембранные танки были установлены примерно на 75 % эксплуатируемых газовозов. Чтобы сохранить газ при температуре -163°C в процессе перевозки и свести к минимуму его испарение, все системы грузовых танков имеют мощную и дорогостоящую изоляцию. Тем не менее в сутки испаряется до 0,15 % перевозимого газа. Лучшие на сегодняшний день проекты газовозов допускают испарение газа в сутки в пределах 0,10 % и менее.

Одновременно со строительством газовозов увеличенной грузоместимости для перевозок на дальние расстояния развитие национальных инфраструктур газообеспечения приводит к вступлению в строй также небольших газовозов СПГ прибрежного плавания для перевозок на короткие расстояния, в частности, для распределения газа в прибрежных водах Норвегии и Японии. На газовозах небольшой вместимости устанавливаются цилиндрические грузовые танки. Скорость этих судов составляет 12 – 15,5 уз.

В 2009 г. вступил в строй первый многоцелевой газовоз *Coral Methane* грузоместимостью 7 500 куб. м постройки польской верфи Remontowa SA, предназначенный для перевозки СПГ, сжиженных нефтяных газов и сжиженного этилена. Это судно голландского судовладельца Anthony Veder используется по перевозке газа в прибрежных водах Норвегии. В 2012 г. для этого судовладельца на германской верфи Meyer Werft был построен газовоз *Coral Energy* грузоместимостью 15 600 куб. м ледового класса 1A (аналогичный ледовому классу Arc4 согласно правилам Российского морского регистра судоходства); судно работает по распределению газа по побережью Скандинавии. Для импорта СПГ с Сахалина в Японию совместным предприятием компаний «Mitsui OSK Lines» и «Hiroshima Gas» в 2007 г. построен газовоз *Sun Arrows* грузоместимостью 19 100 куб. м ледового класса ЛУЗ (Ice2) по правилам Российского морского регистра судоходства с грузовыми танками типа «Moss»; судно способно самостоятельно преодолевать лед толщиной до 70 см [3]. Кроме того, в настоящее время строятся газовозы-бункеровщики СПГ.

Все верфи-строители газовозов СПГ расположены на Дальнем Востоке: в Южной Корее (Hyundai Heavy Industries Co Ltd (HHI), Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co Ltd (DSME), Samsung Heavy Industries Co Ltd (SHI), STX Jinhae Shipyard) и Японии (Mitsubishi Heavy Industries Ltd, Kawasaki Heavy Industries Ltd, Japan Marine United Corp., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co Ltd, Imabari Shipbuilding Co Ltd). Начиная с 2008 г. на верфи Hudong-Zhonghua Shipbuilding Co Ltd в Китае тоже ведется строительство газовозов. В Европе газовозы СПГ до 2007 г. строились во Франции на верфи Chantiers de l'Atlantique.

Ведущими мировыми владельцами / операторами газовозов СПГ являются компании Японии (Mitsui OSK Lines (MOL), NYK, K-Line), Великобритании (The Shell Trading and Shipping Company, Golar LNG) Малайзии (Malaysia International Shipping Company (MISC)).

Компания «Qatar Gas Transport Company» (QGTC), названная в Катаре «Nakilat», оперирует флотом, состоящим из 54 газовозов СПГ, в том числе 25 судов у нее находится в полной собственности, среди которых 14 судов Q-max и 11 — Q-flex.

Энергетические установки

Со времени постройки в 1964 г. первых газовозов СПГ в качестве главного двигателя на них традиционно используются паровые турбины, работающие от паровых котлов, потребляющих два типа топлива: испаряющийся в грузовых танках перевозимый газ и частично или полностью бункерное тяжелое топливо. Паровая турбина работает через редуктор на гребной винт. При таком двигателе значительно ниже стоимость технического обслуживания и другие эксплуатационные

расходы. Однако весомым недостатком паровой турбины является низкая тепловая эффективность, приводящая в итоге к большим расходам перевозки СПГ. Крупные газовозы требуют большей мощности двигателя, чем могут выработать паровые турбины.

После почти 40 лет монопольного использования паровой турбины в качестве главного двигателя начали использоваться дизель-электрические движительные установки, потребляющие два типа топлива: дизельное и испаряющийся перевозимый газ (DFDE — Dual-Fuel Diesel Electric). Первым газовозом СПГ с установкой DFDE является судно *Gaz de France Energy*, построенное в 2004 г. на французской верфи Chantiers de l'Atlantique для компании Gaz de France. На судне установлены четыре среднеоборотных дизеля, которые работают на испаряющемся СПГ, а при его отсутствии (в балластном переходе) — на дизельном топливе. Эффективность газовозов с установкой DFDE на 25 – 30 % выше, чем с паровой турбиной.

На построенных крупнейших газовозах вместимостью по 210 000 – 270 000 куб. м в качестве главного двигателя установлены по два малооборотных дизеля, работающих на тяжелом топливе, и по два гребных винта. Поскольку испаряющийся перевозимый газ не используется, на борту судна монтируется установка повторного сжижения. Испарившийся и затем вновь сжиженный газ возвращается обратно в грузовые танки.

Вслед за установками DFDE внедряются ДЭУ, потребляющие три типа топлива: тяжелое, дизельное и испаряющийся перевозимый газ (TFDE – Tri-Fuel Diesel Electric). Установки TFDE обладают большей эксплуатационной гибкостью и эффективностью при работе на различных скоростях. Энергетические установки DFDE / TFDE использованы почти на 25 % эксплуатируемых газовозов и примерно 30 % в портфеле заказов составляют заявки на строительство газовозов с этими судовыми энергетическими установками.

Одной из последних инноваций в развитии газовозов является внедрение малооборотных двигателей так называемого *типа М* с электронной системой регулирования и впрыска газа — двигателей ME-GI (M-type, Electronically Controlled, Gas Injection), которые работают непосредственно на испаряющемся в грузовых танках газе либо при необходимости на обычном топливе. Двигатель ME-GI обеспечивает наиболее высокую тепловую эффективность, минимальное потребление топлива и значительное сокращение эмиссии CO₂, NO_x и SO_x [6], [7]. Первый газовоз с таким двигателем *Creole Spirit* постройки корейской верфи DSME для канадской компании Teekay LNG Partners вступил в строй в феврале 2016 г. [8].

Газовозы, оборудованные для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах и в ледовых условиях

Первыми газовозами, оборудованными для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах с оговоркой *winterization*, являются четыре судна, построенные в 2006 г.: *Arctic Discoverer*, *Arctic Lady*, *Arctic Princess* и *Arctic Voyager* грузоместимостью по 140 000 – 145 000 куб. м, предназначенные для перевозки СПГ с месторождения Сновит в Северной Норвегии через Северную Атлантику в США и Европу. Судна рассчитаны на 40 лет эксплуатации при температуре –18 °С и волновых условиях Северной Атлантики. На газовозах предусмотрен паровой обогрев бортов на верхней палубе, а также борта, которым газовоз швартуется к причалу, грузового манифолда, переходного мостика, шкиперской кладовой, румпельного отделения, а также площадки для посадки в спасательную шлюпку. Крылья мостика крытые, с подогреваемыми окнами и тепловой изоляцией. Предусматривается электрообогрев окон жилых помещений и комбинированный электропаровой обогрев наружных дверей. Для устранения обледенения антенн и другого оборудования, расположенного на крыше рулевой рубки, предусмотрены электронагреватели. С целью устранения обледенения предусмотрена подача горячей воды и полив якорей, грузовых манифолдов, куполов грузовых танков. Предусмотрены переносные паровые шланги и паровая продувка.

Первое место в мире по размеру флота газовозов СПГ с высоким ледовым классом занимает греческая компания «Dynagas Ltd». Её суда *Clean Power* (в настоящее время *Ob River*) и *Clean Force*

грузовместимостью по 149 700 куб. м стали первыми газовозами с ледовым классом 1А Регистра Судоходства Ллойда, аналогичным классу Arc4, с оговоркой *winterization*. Суда были построены в 2007 – 2008 гг. на верфи Hyundai Heavy Industries Co Ltd в Южной Корее.

В 2010 г. для норвежской компании «Knutsen OAS Shipping» в Южной Корее на верфи Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co Ltd был построен газовоз *Ribera Del Duero Knutsen* грузовой вместимостью 173 400 куб. м ледового класса 1А *winterization*.

В 2013 г. компания «Dynagas Ltd» построила три газовоза грузовой вместимостью по 155 000 куб. м ледового класса 1А, *winterization*: *Arctic Aurora*, *Lena River* и *Yenisei River*. Эти суда имеют дизель-электрическую энергетическую установку, работающую на трех сортах топлива (TFDE). В 2014 – 2015 гг. компания построила еще четыре газовоза грузовой вместимостью по 162 000 куб. м такого же класса 1А, *winterization*: *Clean Ocean*, *Clean Planet*, *Clean Horizon* и *Clean Vision*. Газовоз *Ob River*, зафрахтованный ПАО «Газпром», является первым газовозом СПГ, прошедшим в 2012 г. по Северному морскому пути.

Газовозы с установками регазификации

В целях подачи перевозимого газа непосредственно в энергетическую систему потребителя, отказа от специализированных береговых терминалов, стоимость которых составляет многие миллионы долларов, и снижения рисков срывов поставок газа (например, вследствие возможных повреждений терминалов, вызванных ураганами, взрывами и пожарами, террористическими актами), начали строиться газовозы с установками регазификации — LNGRV (LNG regasification vessel) и с разгрузкой у оффшорного точечного плавучего буя. Так, бельгийская компания «Exmar NV» в 2005 – 2006 гг. построила серию из трёх таких судов: *Excelsior*, *Excellence* и *Excelerate* вместимостью по 138 000 куб. м на южнокорейской верфи DSME и в 2008 – 2010 гг. еще четыре аналогичных судна: *Explorer*, *Exquisit*, *Expedient* и *Exemplar* вместимостью по 150 900 куб. м.

Суда построены по так называемой концепции «энергетический мост», разработанной компанией Exmar и южнокорейской верфью DSME. Данная концепция предполагает наличие на судне установки регазификации, шарнирного поворотного швартовного устройства с манифолдом, а также соответствующего оффшорного погруженного точечного плавучего буя и подводной трубопроводной системы. Судовая установка регазификации позволяет судну преобразовывать из жидкого состояния в газообразное перевозимый СПГ, выгружая его под большим давлением (от 35 до 100 бар) через оффшорный швартовный буй. Затем газ по подводному трубопроводу направляется непосредственно в энергетическую трубопроводную систему потребителя. Точечный швартовный буй и судовое шарнирное поворотное швартовное устройство позволяют осуществлять выполнение швартовной операции и подсоединение к газопроводу для разгрузки на волнении высотой до 6 м.

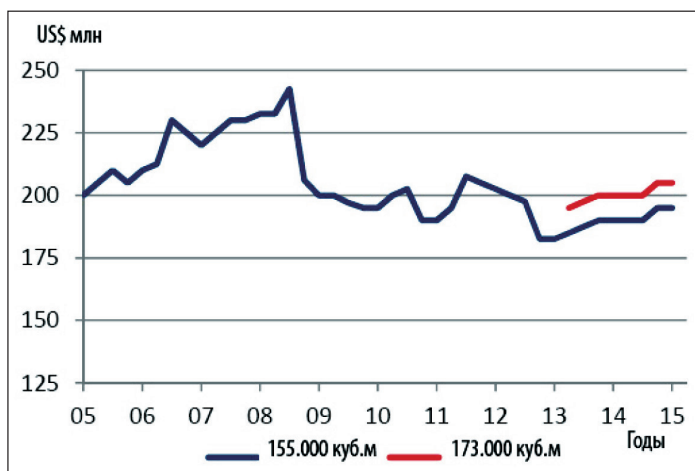
Система «энергетический мост» может быть установлена в любой точке Земного шара. Её действенность впервые была успешно продемонстрирована в марте 2005 г., когда первое судно LNGR–*Excelsior*, выгрузилось у погруженного точечного швартовного буя в Мексиканском заливе в 116 милях от побережья штата Луизиана США. Суда, построенные по этой концепции, могут разгружаться также у любого берегового терминала с приемным газопроводом, как и обычные газовозы.

В 2009 – 2010 гг. норвежской компанией «Leif Hoegh» и японской «MOL» на южнокорейской верфи SHI совместно было построено два челночных газовоза с установкой регазификации SRV: shuttle and regasification vessel — *GDF Suez Neptune* и *GDF Suez Cape Ann*. Эти суда обслуживают глубоководный оффшорный порт Нептун штата Массачусетс, США. Каждое такое судно вместимостью по 145 000 куб. м может разгружаться за 4 – 8 сут и регазифицировать 18 000 – 34 000 куб. м СПГ в сутки.

Цены газовозов СПГ

Цены судов не являются постоянными и существенно колеблются в зависимости от спроса и предложения, состояния мировой экономики, наличия конкурирующих верфей и других факто-

ров. Динамика цен газозовов СПГ, наиболее востребованных в настоящее время по информации RS Platou Monthly (April 2015) за последние 10 лет, показана на рисунке.



Динамика цен постройки газозовов СПГ за 2005 – 2015 гг.

Контрактная цена газозова с установкой регазификации LNGRV примерно на 20 % выше стандартного газозова грузовой вместимостью 145 000 – 150 000 куб. м с паротурбинной установкой, а аналогичного челночного газозова SRV — выше на 30 %. Цена газозовов по проекту Q-flex вместимостью 210 000 куб. м в 2007 г. была примерно на 15 % выше указанных стандартных газозовов, а цена газозовов вместимостью 266 000 куб. м по проекту Q-max — на 30 % выше. На корейской верфи DSME цена газозова грузовой вместимостью 174 000 куб. м составляет 200 – 208 млн долл., а газозова на 172 000 куб. м ледового класса Arc7 — 315,4 млн долл. (декабрь 2014 г.). На китайской верфи Dalian цена газозова на 174 000 куб. м составляет 195 млн долл. (январь 2015 г.).

Стоимость перевозки СПГ морем определяется фрахтовыми ставками, которые, в свою очередь, являются функцией цены судна, стоимости финансирования его постройки, операционных расходов, спроса и предложения. Максимального значения ставки достигли в 2012 г. и с тех пор снижаются. В среднем за 2012 г. фрахтовые ставки для газозова грузовой вместимостью 155 000 куб. м составляли 125 млн долл./сут, в 12-месячном тайм-чартере – 136 млн долл./сут. В феврале 2015 г. ставки составляли в среднем 40 – 50 млн долл./сут, а в конце 2015 г. они снизились примерно до 25 млн долл./сут.

Российские проекты СПГ

По величине разведанных запасов газа среди нефтегазовых компаний мира лидером является ПАО «Газпром». Его доказанные запасы по международным стандартам PRMS по состоянию на 31.12.2015 г. составляют 23 705,0 млрд куб. м. Доля Газпрома в мировых запасах составляет 17 %, в российских — 72 %. Газпром занимает и первое место в мире по объему добычи газа и по его экспорту в Европу. В 2015 г. доля Газпрома составила 11 % мирового и 66 % российского объема добычи газа. Основные добычные объекты Газпрома находятся в Надым- Пур-Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, где добывается 77 % газа. На территории Российской Федерации в 2015 г. Газпромом было добыто 419,5 млрд куб. м природного и попутного газа [10]. В планах Газпрома освоение месторождений в акватории Обской и Тазовской губ, на шельфе арктических и дальневосточных морей. Объем продажи газа Газпромом в дальнее зарубежье составляет 40,3 млрд куб. м, при этом его доля в потребляемом газе странами европейского дальнего зарубежья составляет 30,9 %.

Крупнейшими российскими СПГ-проектами являются: проект «Сахалин-2», проект «Ямал СПГ», проект «Арктик СПГ», Штокмановский проект, а также проекты: Балтийский СПГ, Вла-

дивосток СПГ, строительство регазификационного терминала СПГ в Калининградской области и др.

Проект «Сахалин-2». Первый в России завод по производству СПГ в 2009 г. был построен на Дальнем Востоке — на юге о. Сахалин в пос. Пригородное компанией «Сахалин Энерджи Инвестмент Компании Лтд» в рамках реализации проекта «Сахалин-2». Завод, имеющий проектную производительность 9,6 млн т СПГ в год, включает две технологические линии производительностью по 4,8 млн т в год и причал для отгрузки СПГ на морские суда [11]. В 2010 г. завод вышел на проектную производительность и даже превысил её. Реализация программы повышения производственной эффективности и надежности привела к устойчивому увеличению производительности завода на 10 %. В 2015 г. была осуществлена модернизация первой технологической линии, её мощность увеличилась еще на 1 – 2 %. В 2015 г. завод произвел 10,82 млн т СПГ.

Нефтегазовые месторождения на шельфе Сахалина были открыты в 1980-х гг., однако их освоение началось в 1996 г. Ресурсной базой проекта «Сахалин-2» являются Пилтун - Астохское нефтяное и Лунское газовое месторождения, расположенные в Охотском море в 13 – 16 км от северо-восточного побережья Сахалина. Глубины моря в районе месторождений находятся в пределах 28 – 48 м. Суммарные извлекаемые запасы углеводородов по проекту составляют: газа — свыше 600 млрд куб. м, нефти и конденсата — 170 млн т. Оператором проекта является компания «Сахалин Энерджи», а её акционерами в настоящее время выступают ПАО «Газпром» (50 % плюс одна акция), англо-голландская компания «Royal Dutch Shell» (27,5 % минус одна акция), японские группы «Mitsui» (12,5 % акций) и «Mitsubishi» (10 % акций). Компания «Сахалин Энерджи» была создана в 1994 г. специально для разработки нефтегазовых месторождений. В 2015 г. «Сахалин Энерджи» отгружала СПГ в Японию 70,62 % продаж, Южную Корею — 25,16 %, Китай — 1,83 %, Тайвань — 2,39 % [12]. Доля сахалинского СПГ в Азиатско-Тихоокеанском регионе составила примерно 6 %, на мировом рынке — около 4 %. Поставки СПГ с завода законтрактованы на 20 – 25 лет вперед.

Специально для транспортировки СПГ с завода потребителям в конце 2007 г. – начале 2008 г. ПАО «Совкомфлот» в консорциуме с японской компанией NYK Line на японской верфи Mitsubishi Heavy Industries Ltd были построены два газовоза грузоподъемностью по 145 000 куб. м ледового класса Ice2: *Grand Elena* и *Grand Aniva*. Вторым российским оператором газовозов СПГ явилось ОАО «Приморское морское пароходство», которое в консорциуме с другими японскими компаниями: MOL и «K» Line, на японской верфи Mitsui Engineering and Shipbuilding Co Ltd в 2008 г. построило аналогичный газовоз *Grand Mereya*, который также используется для экспорта сахалинского газа. Указанные танкеры зафрахтованы компанией «Сахалин Энерджи» на долгосрочной основе. Кроме, того на краткосрочной основе компанией зафрахтованы газовозы *Amur River* и *Ob River*. Перевозки сахалинского СПГ осуществляют также суда импортеров.

В 2015 г. компанией «Сахалин Энерджи» были подписаны договоры на разработку проектной документации для реализации проекта строительства третьей технологической линии завода СПГ в рамках проекта «Сахалин-2» производительностью 5,4 млн т в год. Разработка проектной документации будет выполняться компанией «Shell Global Solutions International» и российским проектным институтом АО «Гипрогазцентр».

Проект «Ямал СПГ». Проект «Ямал СПГ» на сегодняшний день является самым масштабным и амбициозным, реализуемым в российской Арктике. Оператором проекта, владельцем лицензии и всех активов является ОАО «Ямал СПГ». В 2015 г. доли акционеров в «Ямал СПГ» составляли: ОАО «НОВАТЭК» — 60 %, Total, Франция — 20 %, CNPC, Китай — 20 %. В декабре 2015 г. «НОВАТЭК» заключил юридически обязывающее соглашение о продаже 9,9 %-й доли в уставном капитале ОАО «Ямал СПГ» китайскому инвестиционному «Фонду Шелкового пути». В результате закрытия сделки доля НОВАТЭКа в проекте снизилась до 50,1 % [13].

В рамках проекта «Ямал СПГ» осуществляется строительство завода по производству СПГ мощностью 16,5 млн т в год на ресурсной базе Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения, расположенного на северо-востоке п-ва Ямал и открытого в 1974 г. Это месторождение,

по данным на 31 декабря 2015 г., содержит 522 млрд куб. м доказанных запасов природного газа и 15 млн т доказанных запасов жидких углеводородов по стандартам SEC. Проектный уровень добычи месторождения превышает 27 млрд куб. м газа в год на протяжении как минимум 20 лет и получения 1 млн т стабильного газового конденсата в год. СПГ-завод включает три технологические линии, мощностью 5,5 млн т в год каждая.

В соответствии с реализацией проекта «Ямал СПГ» создана соответствующая инфраструктура, включающая морской порт в пос. Сабетта и аэропорт. Проводятся дноуглубительные работы в акватории порта, подходном и морском каналах. Ведется строительство ледозащитного сооружения, на котором устанавливается отгрузочная эстакада СПГ, и строительствозавода по переработке газоконденсата. Начало производства СПГ на Ямале запланировано с 2017 г. Поставки газа планируется осуществлять на рынки стран АТР, Западной Европы и Южной Америки. Для бесперебойной круглогодичной транспортировки СПГ по Северному морскому пути оператор проекта ОАО «Ямал СПГ» планирует использовать флот в составе до 16 судов-газовозов, грузоместимостью около 170 000 куб. м каждый, арктического ледового класса Arc7. В период арктического лета СПГ будут поставлять на рынки стран АТР по Северному морскому пути арктическими газовозами. В зимний период арктические газовозы будут заходить на терминал в Западной Европе, где будет осуществляться перевалка СПГ на конвенционные газовозы для его последующей доставки в страны АТР через Суэцкий канал.

В 2013 г. по итогам рассмотрения предложений на постройку газовозов, которые представили семь ведущих верфей мира, победителем тендера была признана корейская судостроительная верфь Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering. С верфью было подписано соглашение, которое предусматривало постройку 16 газовозов, а также устанавливало их предварительную стоимость, график строительства и поставки. Кроме того, верфь DSME взяла на себя обязательство предоставить российскому судостроительному заводу необходимые компетенции для строительства газовозов, включая передачу проектной и иной технической документации, а также возможность обучения российских инженеров и рабочих и передачи части работ на субподряд российскому производителю. Соглашение о строительстве газовозов было заключено между DSME и «Ямал СПГ», однако допускается возможная передача права собственности на новые газовозы сторонним компаниям-перевозчикам. Для выбора компании-перевозчика ОАО «Ямал СПГ» был проведен международный тендер с участием восьми ведущих судовладельцев, имеющих соответствующий опыт и квалифицированных в качестве операторов танкеров-газовозов СПГ. В результате конкурсного отбора был сформирован шорт-лист, в который вошли ПАО «Совкомфлот», «Teekay» (Канада) в партнерстве с «CLNG» (Китай) и «MOL» (Япония) в партнерстве с «CSLNG» (Китай).

Пилотный газовоз, предназначенный для «Совкомфлота», был спущен на воду в начале 2016 г., поставка его намечена на первый квартал 2017 г. Судно является уникальным по техническим характеристикам, оно не имеет аналогов в мире: его длина составляет 299 м, ширина — 50 м, высота борта от киля — 26,5 м, осадка в грузу — 11,8 м, дедвейт — 80 200 т, эксплуатационная скорость на чистой воде — 19,5 уз; пропульсивный комплекс включает три винто-рулевых колонки типа «Азипод» общей мощностью 45 мВт, что сопоставимо с мощностью атомного ледокола типа «Россия» (55 мВт). Судно будет двойного действия, т. е. плавать на чистой воде и в тонких льдах носом вперед, а в толстых льдах и при наличии ледяных торосов — кормой вперед. Судно будет иметь ледопроездимость в сплошном льду толщиной до 2,1 м. Грузовая система усиленного мембранного типа гарантирует безопасную транспортировку газа в сложных ледовых условиях Арктики. Проект газовоза разработан финской фирмой «Aker Arctic Technology» при участии Американского бюро судоходства. О контракте на строительство газовозов по проекту «Ямал СПГ» компанией «Teekay» было объявлено в 2014 г. В соответствии с соглашением совместное предприятие компаний «Teekay LNG» и «China LNG» построит на верфи DSME шесть газовозов грузоместимостью по 172 000 куб. м ледового класса Arc7, общей стоимостью примерно 2,1 млрд долл., поставка судов будет осуществляться в 2018 – 2020 гг. [14]. В 2014 г. также совместным пред-

приятием компаний MOL и China Shipping (Group) подписан контракт с верфью DSME на строительство трех таких газозовозов.

Проект «Арктик СПГ». Этот проект является вторым СПГ-проектом НОВАТЭКа, завод по которому планируется построить на Гыданском п-ве. Газ для сжижения будет поступать с Салмановского (Утреннего) и Геофизического нефтегазоконденсатных месторождений.

Салмановское (Утреннее) месторождение было открыто в 1980 г. По величине извлекаемых запасов является крупнейшим месторождением, открытым на Гыданском п-ве. Доказанные запасы месторождения по стандартам SEC на конец 2014 г. составляют 259,8 млрд куб. м газа и 9,6 млн т жидких углеводородов. Геофизическое нефтегазоконденсатное месторождение, расположенное в средней части Гыданского п-ва на побережье Обской губы, было открыто в 1975 г. Доказанные запасы месторождения по стандартам SEC на конец 2014 г. составляют 125,6 млрд куб. м газа и 0,4 млн т жидких углеводородов. Эти месторождения, а также Северо-Обский лицензионный участок осваивают принадлежащие НОВАТЭКУ ООО «Арктик СПГ 1», «Арктик СПГ 2» и «Арктик СПГ 3», которым предоставлено право на экспорт СПГ.

Технологическая концепция завода СПГ определяется совместно с немецкой компанией «Linde». Начало строительства завода запланировано на 2018 г. Первую очередь завода мощностью 5,5 – 6 млн т планируется построить и ввести в эксплуатацию в 2018 – 2022 гг., вторую и третью очереди такой же мощности — соответственно в 2019 – 2024 гг. и в 2020 – 2025 гг.

Штокмановский проект. Штокмановское газоконденсатное месторождение было открыто в 1988 г. Оно расположено в центральной части российского сектора Баренцева моря, примерно в 600 км к северо-востоку от Мурманска. Глубина моря в этом районе колеблется от 320 до 340 м. Запасы месторождения составляют 3,9 трлн куб. м газа и 56 млн т газового конденсата.

Добыча газа на Штокмановском месторождении предполагается с помощью подводных комплексов и плавучих производственных платформ с возможностью их быстрого отсоединения и эвакуации с траектории движения айсбергов в случае их появления. Добытый газ планируется доставлять по подводным магистральным трубопроводам на берег в район пос. Териберка Мурманской области, где будут построены завод по производству СПГ мощностью 7,5 млн т в год, портовый транспортно-технологический комплекс и другие производственные объекты. Перевозить СПГ потребителям предполагается на газозовозах вместимостью от 150 до 220 тыс. куб. м. Всего для перевозки СПГ потребуется до 23 таких судов. Однако в начале 2010 г. Газпром объявил о переносе сроков добычи газа на месторождении, а в 2012 г. разработку месторождения отложили вследствие больших расходов.

Проект «Балтийский СПГ». Этот проект нацелен на европейские рынки, а также страны Латинской Америки. Кроме того, планируется использование продукции завода для газоснабжения Калининградской области и для обслуживания рынка бункеровки и осуществления малотоннажных поставок на Балтике. Ресурсная база проекта — месторождения Ямала и Надым-Пур-Тазовского региона. Мощность СПГ-завода с двумя технологическими линиями составит 10 млн т в год с возможностью расширения до 15 млн т в год. Завод будет построен в районе морского порта Усть-Луга. Газ на завод будет поступать из Единой системы газоснабжения России, что гарантирует бесперебойность поставок. Выпуск продукции планируется начать в конце 2018 г. Компанией-оператором проекта является ООО «Газпром СПГ Санкт-Петербург».

Проект «Владивосток СПГ». Проект предполагает строительство в районе г. Владивостока завода по производству СПГ мощностью не менее 15 млн т в год. Первую линию мощностью 5 млн т в год планируется ввести в 2018 г. Ресурсной базой для завода станет газ Сахалинского (проект «Сахалин-3»), Якутского и Иркутского центров газодобычи.

Регазификационный терминал СПГ в Калининградской области. Получение природного газа морским транспортом значительно повысит энергетическую безопасность Калининградской области. На побережье Балтийского моря Газпром построит регазификационный терминал СПГ, который будет подключен к существующему газопроводу в районе Калининградского подземного хранилища газа, что даст возможность направлять газ как потребителям области, так и закачивать

его в подземное хранилище. Производительность терминала составит не менее 9 млн куб. м газа в сутки. Планируется, что уже в конце 2017 г. терминал сможет принять первую партию СПГ. В качестве источника СПГ на начальном этапе рассматривается внешний рынок, затем его заменит газ проекта «Балтийский СПГ», первую очередь которого планируется ввести в эксплуатацию в конце 2018 г.

Проекты ПАО «НК «Роснефть»». Нефтяная компания «Роснефть» является третьим производителем газа в РФ. В 2015 г. добыча газа НК «Роснефть» составила 62,54 млрд куб. м (20 % в общей добыче углеводородов).

С целью монетизации газа проекта «Сахалин-1» и собственных шельфовых месторождений НК «Роснефть» в районе о. Сахалин планирует реализацию проекта «Дальневосточный СПГ», в том числе строительство завода СПГ, производительность первой очереди которого составляет 5 млн т в год, а также морского порта отгрузки СПГ и сопутствующей инфраструктуры [9].

В декабре 2015 г. было завершено создание совместного предприятия с группой «Аллитек» с целью формирования нового центра газодобычи в Ненецком автономном округе, в рамках которого предполагается разработка Кумжинского и Коровинского месторождений, строительство завода СПГ и сопутствующей инфраструктуры, — проект «Печора СПГ».

Суда-газовозы СПГ ПАО «Совкомфлот». Российской компанией, эксплуатирующей суда для перевозки сжиженного природного газа, является ПАО «Совкомфлот», занимающее второе место в мире по размеру флота танкеров-газовозов СПГ с ледовым классом. Как отмечалось ранее, «Совкомфлотом» в 2007 – 2008 гг. для перевозки СПГ в рамках проекта «Сахалин-2» были построены газовозы *Grand Elena* и *Grand Aniva*.

В 2008 г. Совкомфлот в консорциуме с японской компанией «NYK Line» построил два газовоза: *Tangguh Batur* и *Tangguh Towuti*, грузоместимостью по 145 700 куб. м каждый, которые работают в рамках проекта Tangguh на перевозках СПГ из Индонезии в Китай.

В 2014 г. «Совкомфлот» на верфи STX Offshore & Shipbuilding (Южная Корея) построил два газовоза: *Великий Новгород* и *Псков* грузоместимостью около 170 000 куб. м ледового класса Ice2, которые используются на перевозках СПГ дочерней компанией ПАО «Газпром» — «Gazprom Marketing & Trading» на условиях долгосрочного тайм-чартера. Суда имеют дизель-электрическую энергетическую установку, работающую на трёх типах топлива, и комплекс оборудования для работы в условиях низких температур.

В 2015 г. «Совкомфлот» построил два аналогичных судна: *SCF Melampus* и *SCF Mitre*, которые работают в рамках долгосрочных тайм-чартеров с компанией «Royal Dutch Shell».

Выводы

1. Международная торговля природным газом в 2015 г. достигла 1 042,4 млрд куб. м. При этом по трубопроводам было транспортировано 704,1 млрд куб. м газа или 67,5 %, а морскими судами в сжиженном состоянии — 338,3 млрд куб. м или 32,5 %.

2. Наблюдается быстрый рост мирового флота судов для перевозки СПГ. В начале 2016 г. этот флот включал 427 судов суммарной грузоместимостью 62,41 млн куб. м. В портфеле заказов судостроительных верфей находились еще 157 судов суммарной грузоместимостью 24,94 млн куб. м.

3. Россия занимает второе место в мире по запасам природного газа — её запасы оцениваются 32,3 трлн куб. м (первое место занимает Иран — 34,0 трлн куб. м).

4. В 2015 г. Россия экспортировала 207,5 млрд куб. м газа, что составило 19,9 % мирового экспорта. Россия поставляет природный газ преимущественно по трубопроводу в страны Европы, Турцию, Беларусь и Украину. Доля России в экспорте СПГ на мировом рынке составляет около 4 %. Экспорт СПГ осуществляется с Сахалина.

5. По величине разведанных запасов газа лидером среди нефтегазовых компаний мира является ПАО «Газпром», доля которого в мировых запасах составляет 17 %, в российских — 72 %. Газпром занимает первое место в мире по объему добычи газа и развивает крупные СПГ-проекты: «Сахалин-2», Балтийский СПГ, «Владивосток СПГ», регазификационный терминал в Калинин-

градской области. Реализуется крупнейший российский проект «Ямал СПГ», производство СПГ на котором планируется начать в 2017 г. В настоящее время акционерами ОАО «Ямал СПГ» являются ОАО «НОВАТЭК» — 50,1 %, Total — 20 %, CNPC — 20 % и китайский инвестиционный «Фонд Шелкового Пути» — 9,9 %. В рамках проекта «Ямал СПГ» строится морской порт Сабетта и завод СПГ, включающий три технологические линии, производительностью по 5,5 млн т в год каждая. Развивает газовый бизнес и ПАО «НК «Роснефть»».

6. Российским оператором газозовов СПГ является ПАО «Совкомфлот», которое построило и использует восемь газозовов СПГ, в том числе ледового класса Ice2. Совкомфлот строит пилотный арктический газозов для вывоза СПГ по проекту «Ямал СПГ» грузоместимостью 170.000 куб. м ледового класса Arc7 на корейской верфи Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering. Судно уже спущено на воду и получило название «*Christophe de Margerie*», оно будет нести флаг Кипра; вступление судна в эксплуатацию намечено на I квартал 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агарков С. А. Экономические региональные особенности морской транспортировки сжиженно-го природного газа / С. А. Агарков, Г. П. Евдокимов, С. Ю. Козьменко / Геополитика и безопасность. — 2015. — № 2 (30). — С. 73–82.
2. BP Statistical Review of World Energy. — 65th edition. — UK: Pureprint Group Limited, 2016. — 46 p.
3. Евдокимов Г. П. Суда для перевозки природного и нефтяных газов российского и мирового флота: монография / Г. П. Евдокимов; Союз рос. судовладельцев, Центр. науч.-иссл. и проектно-конструкт. ин-т мор. флота. — СПб.: ЦНИИМФ, 2009. — 285 с.
4. Евдокимов Г. П. Морская транспортировка природного газа: региональный экономический аспект / Г. П. Евдокимов // Северный морской путь: развитие Арктических коммуникаций в глобальной экономике «Арктика-2015»: VI Всероссийская морская научно-практическая конференция: материалы конференции. — Мурманск: Мурманский государств. техн. ун-т, 2015. — С. 34–35.
5. Shipping Statistics and Market Review. — Bremen, Germany: ISL Institute of Shipping Economics and Logistics, 2016. — № 3. — 68 p.
6. DieselFacts: A Technical Customer Magazine of MAN Diesel & Turbo. — Peter Dan Petersen, MAN Diesel & Turbo, 2015. — № 3. — 12 p.
7. ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines. A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas. — Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. — 24 p.
8. Teekay [Электронный ресурс]: Официальный сайт. — Режим доступа: www.teekaylng.com (дата обращения — 10.10.16).
9. Стабильность. Технологии. Развитие. Годовой отчет 2015. — ПАО «НК «Роснефть», 2016. — 291 с.
10. Многополярная энергия. Годовой отчет ПАО «Газпром» за 2015 год. — ПАО «Газпром», 2016. — 250 с.
11. Евдокимов Г. П. Россия на пути освоения месторождений природного газа: создание флота газозов / Г. П. Евдокимов, И. И. Костылев // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 1 (38). — С. 62–65.
12. Отчет об устойчивом развитии компании «Сахалин Энерджи» за 2015 год. — Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд., 2016. — 182 с.
13. Устойчивость. Рост. Трансформация. НОВАТЭК. Годовой отчет 2015. — ОАО «НОВАТЭК». — 108 с.
14. Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. [Электронный ресурс]: Официальный сайт. — Режим доступа: www.mol.co.jp (дата обращения — 12.10.16).

THE DEVELOPMENT OF LNG LIQUEFIED NATURAL GAS TO MEET THE DEMAND OF THE WORLD MARKET. RUSSIAN PROJECTS OF LIQUEFIED NATURAL GAS

According to the latest data the reserves, exports and imports of natural gas by countries are shown. The worldwide transportations of liquefied natural gas are presented. The structure of the global LNG fleet is shown and the development of LNG carriers is highlighted. The development of power plants LNG carriers is considered. LNG carriers equipped for long-term operation at low temperatures and in ice conditions are presented. The first place in the World on the size of the fleet of LNG carriers with high ice class is occupied a Greek company Dynagas;

its LNG carrier "Ob River" first went through the Northern sea route. LNG carriers with re-gasification installations are highlighted. Prices of different LNG carriers are given. Russian LNG projects "Sakhalin-2", "Baltic LNG", "Vladivostok LNG", regasification terminal in the Kaliningrad region being developed by PJSC "Gazprom" are shown. The LNG projects "Yamal LNG" and "Arctic LNG" being developed by JSC "NOVATEK" are shown. The development of LNG projects of PJSC "OC "Rosneft" is shown. The fleet of LNG carriers of Russian PJSC "Sovcomflot" is shown. For this fleet the pilot LNG carrier was launched according to the Yamal LNG project. Evolution of the LNG-carriers is motivated by the development of new gas fields and expansion of gas production of already existing ones. LNG market formation is predetermined by the gas basin geography. The key basins are the Pacific Ocean and the Atlantic Ocean. Greater gas volumes are supplied by the Middle East. The article analyses the information regarding the OPEC-countries as the volume of production in these countries predetermines the transportation directions. Such countries as Iran, Russia, Catarrh, Turkmenistan and Middle East countries possess most capacious gas reserves in global terms. However, production volumes do not necessarily mean that all the gas is exported – as can be illustrated by Saudi Arabia and Iran which mostly consume the produced gas inside the countries.

Keywords: Liquefied natural gas, transportation, LNG carriers, power plants, Russian LNG projects.

REFERENCES

1. Agarkov, S. A., G. P. Evdokimov, and S. Ju. Kozmenko "Jekonomicheskie regionalnye osobennosti morskoy transportirovki szhizhennogo prirodnogo gaza." *Geopolitika i bezopasnost* 2(30) (2015): 73–82.
2. *BP Statistical Review of World Energy*. 65th edition. UK: Pureprint Group Limited, 2016.
3. Evdokimov, G. P. *Suda dlja perevozki prirodnogo i neftjanyh gazov rossijskogo i mirovogo flota: monografija*. SPb.: CNIIMF, 2009.
4. Evdokimov, G. P. "Morskaja transportirovka prirodnogo gaza: regionalnyj jekonomicheskij aspekt." *Severnyj morskoy put: razvitie Arkticheskikh kommunikacij v globalnoj jekonomike «Arktika-2015»: VI Vserossijskaja morskaja nauchno-prakticheskaja konferencija: materialy konferencii*. Murmansk: Murmanskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2015: 34–35.
5. *Shipping Statistics and Market Review*. Bremen, Germany: ISL Institute of Shipping Economics and Logistics, 2016. № 3.
6. *DieselFacts: A Technical Customer Magazine of MAN Diesel & Turbo*. Peter Dan Petersen, MAN Diesel & Turbo, 2015. № 3.
7. *ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines. A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas*. Copenhagen, Denmark: MAN Diesel.
8. Teekay. Web. 10 Oct. 2016 <www.teekaylng.com>.
9. *Stabilnost. Tehnologii. Razvitie. Godovoj otchet 2015*. PAO "NK "Rosneft", 2016.
10. *Mnogopoljarnaja jenergija. Godovoj otchet PAO «Gazprom» za 2015 god*. PAO «Gazprom», 2016.
11. Evdokimov, G. P., and I. I. Kostylev. "Russia on the way to gas field development: building a gas carrier fleet." *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice* 1(38) (2012): 62–65.
12. *Otchet ob ustojchivom razvitii kompanii "Sahalin Jenerdzhi" za 2015 god*. Sahalin Jenerdzhi Investment Kompani Ltd., 2016.
13. *Ustojchivost. Rost. Transformacija. NOVATEK. Godovoj otchet 2015*. OAO "NOVATEK".
14. Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. Web. 12 Oct. 2016 <www.mol.co.jp>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костылев Иван Иванович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kostylevii@gumrf.ru
Евдокимов Геннадий Павлович —
кандидат технических наук,
зав. лабораторией морской техники.
ЦНИИМФ
gp_yevdokimov@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kostylev Ivan Ivanovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kostylevii@gumrf.ru
Evdokimov Gennadij Pavlovich —
PhD, Head of the laboratory.
CNIIMF
gp_yevdokimov@list.ru

Статья поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ КОНТЕЙНЕРА НА МЕТАЦЕНТРИЧЕСКУЮ ВЫСОТУ КОНТЕЙНЕРОВОЗА

Высота центра тяжести контейнера нормирована ведущими классификационными обществами как половина высоты контейнера. В основе расчетных алгоритмов грузовых программ, используемых на контейнеровозах, лежит правило, согласно которому центр тяжести контейнера соответствует его геометрическому центру. При этом на практике очень часто фактический центр тяжести не совпадает с геометрическим, что приводит к изменению значения метацентрической высоты судна как одного из критериев остойчивости. В результате экипаж судна получает недостоверные данные о значении метацентрической высоты. Последующие операции по балластировке и бункеровке судна, основанные на неверных данных, могут, как минимум, привести к неоправданным расходам или даже оказать негативное воздействие на безопасность судна. В работе предложен алгоритм оценки влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза. Поставлены задачи: определить возможное положение центра тяжести контейнера исходя из реальных требований технологии перевозки грузов в контейнерах; оценить влияние изменения положения центра тяжести в установленных пределах на остойчивость контейнеровоза расчетно-экспериментальным путем с использованием программ расчета остойчивости действующих современных крупнотоннажных контейнеровозов. Рассмотрены несколько вариантов загрузки контейнеровозов двух типов: реальные варианты загрузки и смоделированные — включающие условия, заданные в рамках данной работы. В ходе расчетного эксперимента получены результаты, позволяющие считать, что принятые стандарты в отношении положения центра тяжести контейнера обоснованы. Доказано, что фактическое положение центра тяжести контейнера практически всегда приводит к увеличению фактической метацентрической высоты судна по сравнению с расчетной. Подчеркнуто, что экипажу судна важно располагать достоверной информацией о положении центра тяжести контейнеров на стадии планирования загрузки для обеспечения безопасности и экономически эффективной работы судна.

Ключевые слова: суда-контейнеровозы, контейнеры, центр тяжести, эксцентриситет, метацентрическая высота, остойчивость, балластировка, безопасность, экономическая эффективность.

Введение

Будучи многооборотной тарой, контейнер загружается различными грузами с различными схемами и качеством укладки. От того, как размещен груз внутри контейнера, зависит положение его центра тяжести (ЦТ), что, в свою очередь, влияет на безопасность контейнерных перевозок. Основными документами, регламентирующими безопасность морской перевозки контейнеров, являются:

- Международная конвенция по безопасным контейнерам (КБК) 1972 г.;
- MSC.1/Circ.1497 IMO / ILO / UNECE Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code);
- MSC.1/Circ.1498 Informative material related to the Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code);
- Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом (РД 31.11.2118-96).

В этих документах, а также в правилах классификационных обществ (КО) устанавливаются нормативы в отношении положения ЦТ контейнера. Фактический ЦТ контейнера может не совпадать с его геометрическим ЦТ как по высоте, так и в продольной плоскости (вдоль и поперек контейнера) — это несовпадение называется *эксцентриситетом контейнера*. В международном стандарте ИСО 830:1999 «Контейнеры грузовые. Словарь» эксцентриситет определен как «продольное и / или поперечное горизонтальное расстояние между положением центра тяжести контейнера (порожного или загруженного, с фитингами и приспособлениями или без них) и геометри-

ческим центром диагоналей между четырьмя нижними угловыми фитингами». Следует отметить, что приведенное понятие эксцентриситета охватывает только продольное отстояние. В то же время правила КО больше внимания уделяют нормированию аппликаты ЦТ. Продольное отстояние ЦТ в значительной степени влияет на сбалансированность контейнера, что критически важно при погрузочно-разгрузочных работах, а также при перевозке контейнеров автомобильным транспортом. При этом учет аппликаты ЦТ необходим при определении ЦТ судна и расчете его остойчивости [1].

В контексте данной статьи определяющим является рассмотрение только вертикального (ΔZ) отклонения фактического ЦТ контейнера от геометрического ЦТ, поэтому под эксцентриситетом понимается вертикальное отклонение фактического ЦТ контейнера от геометрического центра. При этом в используемых в работе схемах и рисунках (для большей наглядности) отображается и продольное отстояние (ΔX).

Несмотря на вероятность наличия эксцентриситета, КО в своих правилах устанавливают нормативы в отношении расчетного положения ЦТ. Эти нормативы используются в алгоритмах расчета остойчивости контейнеровозов. Информация об остойчивости, в которой приводится такой алгоритм расчета, имеется на каждом судне. Кроме того, на каждом современном контейнеровозе имеется специальная грузовая программа, используемая для автоматизированного расчета остойчивости по тому же самому алгоритму. В качестве исходных данных здесь используются координаты ЦТ погруженных на судно контейнеров. Эти координаты устанавливаются исходя из нормативов соответствующего КО, некоторые примеры которых приведены далее. Таким образом, расчет остойчивости, выполняемый с учетом этих допущений, заведомо включает в себя погрешность, вызванную возможным эксцентриситетом контейнера.

До 1 июля 2016 г. — даты вступления в силу поправок к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС) — четкий механизм предоставления достоверных данных хотя бы о массе контейнера, не говоря уже о положении его ЦТ, отсутствовал. Сейчас определение достоверной массы контейнера вошло в практическую стадию, однако вероятность эксцентриситета контейнера все еще остается задачей, требующей решения.

В данной работе авторами выполнена оценка влияния эксцентриситета контейнеров на поперечную остойчивость контейнеровозов и того, насколько это критично с практической точки зрения. Оценка проводилась по одному из основных критериев остойчивости — поперечной метацентрической высоте. Для постановки и решения задачи в работе используются обозначения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Обозначения, принятые в работе

Обозначение	Наименование
W	Водоизмещение судна, т
GM	Начальная метацентрическая высота, м
GM'	Начальная метацентрическая высота, измененная наличием эксцентриситета контейнеров, м
ΔGM	Изменение значения GM , м; $\Delta GM = GM' - GM$
KM	Аппликата метацентра судна от основной плоскости, м
KG	Аппликата центра тяжести судна от основной плоскости, м
KG'	Аппликата центра тяжести судна от основной плоскости, измененная наличием эксцентриситета контейнеров, м
KG_s	Аппликата центра тяжести контейнерного штабеля от основной плоскости, м
ΔKG	Изменение значения KG , м; $\Delta KG = KG' - KG$
VCG_s	Аппликата центра тяжести контейнерного штабеля от его основания, м

Таблица 1
(Окончание)

VCG_i	Аппликата центра тяжести контейнера от его днища, м
ΔVCG	Изменение значения VCG , м
D	Возвышение над основной плоскостью основания, на которое погружен контейнер (настил двойного дна, крышка трюма или контейнер нижнего яруса), м
M_i	Масса контейнера, т
ΔX	Продольное отстояние ЦТ контейнера от геометрического центра
ΔZ	Вертикальное отстояние ЦТ контейнера от геометрического центра; $\Delta Z = \Delta VCG_i$
M_z	Момент относительно основной плоскости судна, тм; $M_z = M_i \cdot VCG_i$
ΣM_z	Суммарный (общий) момент M_z судна, тм
N	Количество контейнеров на борту судна (ДФЭ)

Положение ЦТ контейнера и контейнерного штабеля

Положение ЦТ контейнера в пространстве определяется тремя координатами: абсциссой, ординатой и аппlikатой. В зависимости от решаемой задачи, в качестве систем координат целесообразно использовать две системы (рис. 1 и 2):

- система координат, привязанная к контейнеру или контейнерному штабелю;
- система координат, привязанная к судну.

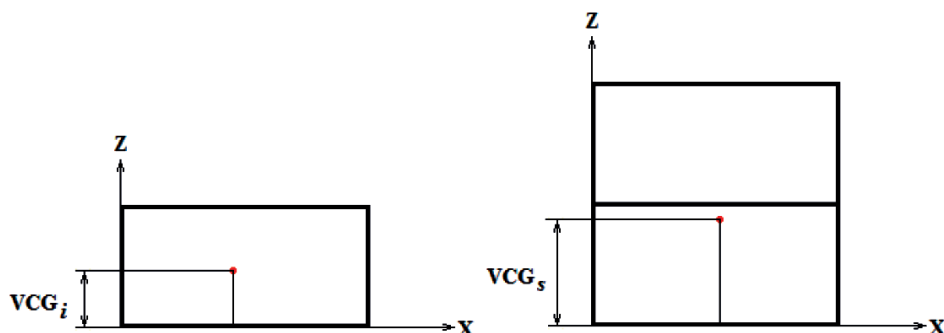


Рис. 1. Система координат, привязанная к контейнеру или контейнерному штабелю

При решении задачи расположения непосредственно ЦТ контейнера, в зависимости от того, как в него загружен груз, необходимо использовать первую систему координат. В этой системе используется значение VCG_i . VCG_s отсчитывается от днища нижнего контейнера.

При расчете остойчивости судна и оценке положения ЦТ погруженных контейнеров как судового груза необходимо использовать вторую систему координат. В этой системе отсчет положения ЦТ ведется от основной плоскости (киля судна): KG — есть расстояние между точками K (киль) и G (центр тяжести).

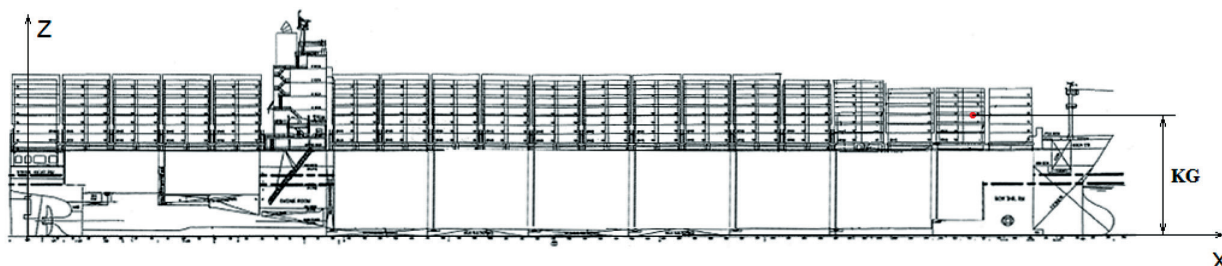


Рис. 2. Система координат, привязанная к судну

Величины KG и VCG связаны между собой следующим образом:

$$KG = VCG + D.$$

ЦТ контейнерного штабеля рассчитывается по формуле

$$VCG_s = \frac{\sum M_i VCG_i}{\sum M_i}$$

или

$$KG_s = \frac{\sum M_i VCG_i}{\sum M_i} + D. \quad (1)$$

Категории контейнеров и соответствующее положение ЦТ

Следует выделить две принципиальные категории контейнеров:

- закрытые контейнеры (любые контейнеры с жестким замкнутым контуром);
- открытые контейнеры (любые открытые контейнеры: платформы, флэтрэки, контейнеры с открытым верхом и т. д.).

Основными типами закрытых контейнеров являются:

- генеральные;
- рефрижераторные;
- танк-контейнеры;
- балк-контейнеры.

В танк- и балк-контейнерах перевозится гомогенный груз, который равномерно заполняет внутренний объем контейнера. В этом случае, при условии полного заполнения контейнера, его фактический ЦТ с некоторым допущением будет соответствовать геометрическому ЦТ контейнера, поэтому проблема эксцентриситета ЦТ в этом случае не возникает.

Стандартные генеральные контейнеры составляют большую часть в объемах контейнерных перевозок. По состоянию загрузки генеральный контейнер может быть:

- порожним;
- полностью загруженным;
- частично загруженным.

Порожний контейнер представляет собой самый простой вариант в контексте рассматриваемой задачи. Фактический ЦТ порожнего контейнера практически полностью совпадает с его геометрическим центром (небольшое отклонение возникает по причине того, что днище контейнера обычно тяжелее крыши). Сложнее обстоят дела с полностью загруженным контейнером. В понятие «полностью загруженный контейнер» можно включить:

- контейнер, полностью загруженный по объему;
- контейнер, полностью загруженный по массе.

Данные по положению аппликаты ЦТ контейнера можно свести в табл. 2.

Таблица 2

Данные по положению аппликаты ЦТ контейнера

Вариант загрузки контейнера	Положение аппликаты ЦТ
Порожний	В геометрическом центре
Полностью загруженный по объему*	Немного ниже геометрического центра
Полностью загруженный по массе	Ниже геометрического центра
Частично загруженный	Ниже геометрического центра
Нестандартная загрузка	Выше геометрического центра

* Важно отметить, что полностью использовать объем контейнера при загрузке генерального груза практически невозможно.

Это объясняется:

- зазорами между упаковками груза;
- технологическими пустотами, необходимыми для установки крепежных материалов;
- пустотами в верхней части контейнера, куда затруднительно подобраться;
- пустотами, образованными по причине того, что габариты упаковки не кратны внутренним габаритам контейнера.

Можно сделать промежуточный вывод о том, что аппликата ЦТ контейнера, за исключением особых случаев, может либо соответствовать геометрическому центру, либо быть ниже его.

Нормирование положения ЦТ

Решая задачи безопасности морских грузоперевозок, классификационные общества, как технические институты, устанавливают нормативы в отношении расчетной аппликаты ЦТ контейнера, которая влияет на состояние остойчивости судна. В правилах разных КО нормативы в отношении ЦТ могут несколько отличаться, но в целом они близки к тому, чтобы считать, что аппликата ЦТ соответствует половине высоты контейнера. Так,

– Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) установлено, что «при расчетах остойчивости контейнеровозов положение центра тяжести каждого контейнера по высоте принимается равным половине высоты контейнера данного типа»;

– Правилами American Bureau of Shipping (ABS) установлено, что «The center of gravity of the container may be normally considered as the midpoint of the container (ЦТ контейнера обычно может считаться соответствующим геометрическому центру контейнера)»;

– Правилами Germanischer Lloyd (GL) установлено, что: «The height of the center of gravity of the container and its cargo is assumed at 45 % of container height (аппликата ЦТ контейнера и его груза принимается равной 45% высоты контейнера)»;

– Кодекс СТУ (разд. 3.1.4) устанавливает, что «ЦТ груза в контейнере, в общем случае, может отклоняться продольно и поперечно от геометрического ЦТ контейнера на $\pm 5\%$, но в отдельных случаях эта величина может достигать $\pm 10\%$, что определяется возможностью современного контейнерного перегрузочного оборудования смещать точку подвеса в зависимости от сбалансированности контейнера»;

– в РД 31.11.21.18-96 (разд. 3.1.3.9) предусмотрено, что «абсцисса ЦТ контейнера не должна отстоять более чем на 60 см от геометрического ЦТ 20-футового контейнера, и 120 см от геометрического ЦТ 40-футового контейнера, что составляет 10 % длины соответствующего контейнера»;

– в кодексе СТУ приводится диаграмма распределения нагрузок (ДРН) на примере 40-футового контейнера (рис. 3). Она позволяет определить допустимое продольное отклонение ЦТ груза в контейнере (ΔX) в зависимости от его массы. ДРН наглядно показывает, что чем тяжелее груз, тем ближе к середине контейнера (геометрическому центру) он должен быть расположен.

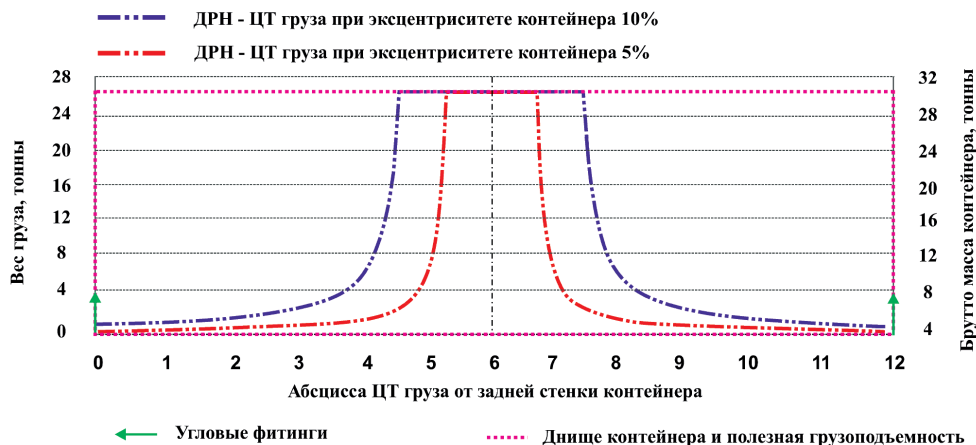


Рис. 3. Диаграмма распределения нагрузок (40-футовый контейнер)

Таким образом, можно резюмировать возможные пределы (рис. 4) эксцентриситета контейнера. Уместно считать, что продольное отклонение ЦТ в случае перевозки грузов с малым удельно погрузочным объемом (УПО) будет меньше, чем при перевозке грузов с УПО больших значений, поэтому можно предположить, что схематическая зона возможного эксцентриситета контейнера будет иметь форму трапеции, обращенной малым основанием вниз.

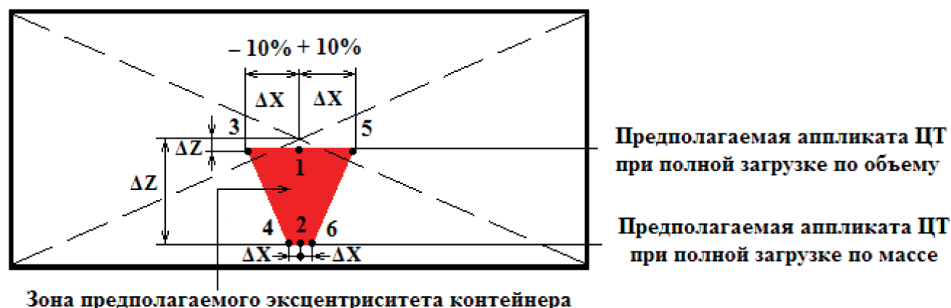


Рис. 4. Предполагаемый эксцентриситет контейнера

С учетом того, что на величину поперечной метацентрической высоты влияет только ΔZ , в расчетах будут использоваться только два положения ЦТ: в точках 1 и 2.

Возможные пределы аппликаты ЦТ контейнера

Максимальная аппликата, как было уже сказано, немного меньше аппликаты геометрического центра. Предположим, что генеральный груз загружен в контейнер равномерно, но остается технологическая пустота в верхней части контейнера высотой 30 см. В этом случае фактический ЦТ контейнера будет ниже геометрического на 15 см. Если принять, что минимальный УПО перевозимого в контейнере груза (свинец) — $0,2 \text{ м}^3/\text{т}$, и учесть одну из принятых форм транспортировки свинца (паллетами $72,5 \times 72,5 \times 50 \text{ см}$), то высота штабеля груза составит около 50 см. При этом груз будет равномерно распределен по днищу контейнера, и грузоподъемность будет полностью выбрана. В этом случае аппликата фактического ЦТ груза с учетом технологических пустот может быть принята равной 24 см. Пределы аппликаты ЦТ контейнера могут быть приняты и другими в зависимости от конкретных условий загрузки контейнеров и других факторов. При этом физическая сущность и схема расчетов останутся неизменными.

В данной работе расчеты основаны на ДФЭ — стандартном 20-футовом контейнере, высота которого 2,6 м, а аппликата геометрического центра, соответственно, 1,3 м. В случае с контейнерами повышенной вместимости (хай-кьюб), высота которых составляет 2,9 м, аппликата геометрического центра должна устанавливаться равной 1,45 м соответственно.

Нестандартные случаи загрузки

Нормативные документы — MSC.1/Circ.1497 IMO / ILO / UNECE Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code), раздел 1.11; MSC.1/Circ.1498 Informative material related to the Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code), разд. 1.5.7; Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом (РД 31.11.2118-96), разд. 3.1.9 — допускают такую загрузку контейнера, при которой центр тяжести груза будет выше половины высоты контейнера (рис. 5, а). При этом четко говорится, что загрузка такого контейнера и его транспортировка должны выполняться по согласованию с участниками перевозки и под особым контролем. Уместно считать, что такие контейнеры занимают незначительную часть в общем объеме перевозимого груза на судне, тем не менее, учет их влияния на остойчивость осуществляется в установленном порядке.

Как пример неблагоприятного, с точки зрения технологии перевозки грузов, варианта, можно допустить такую загрузку судна, при которой тяжелые контейнеры окажутся поверх порожних. Это может быть вызвано необходимостью обеспечить очередность выгрузки в соответствии с ротацией портов. Пример такой ситуации и соответствующий эксцентриситет изображены на рис. 5, б.

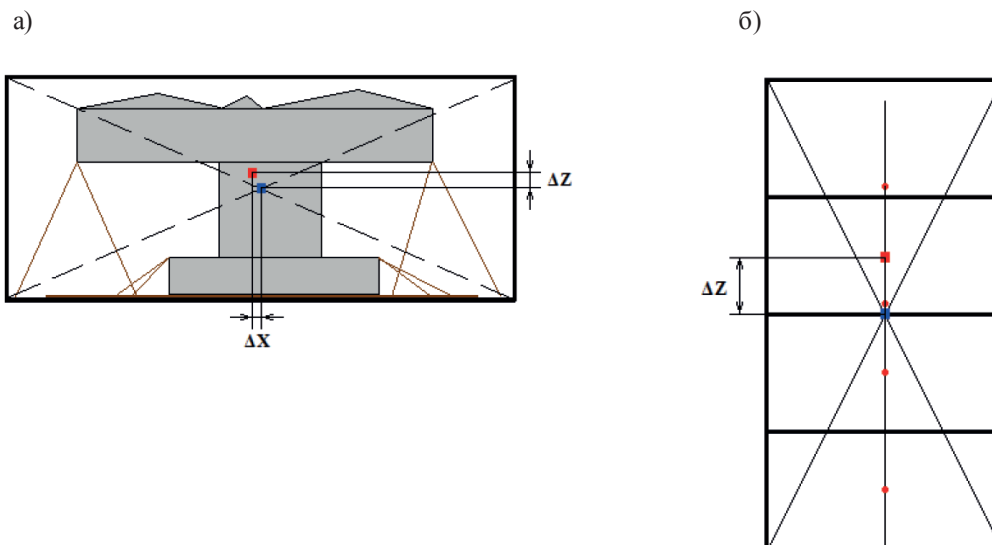


Рис. 5. Нестандартный груз с ЦТ выше геометрического ЦТ контейнера — а;
ЦТ штабеля при загрузке тяжелых контейнеров поверх порожних — б

Определение поперечной метацентрической высоты

Метацентрическая высота (GM) рассчитывается по формуле

$$GM = KM - KG. \quad (3)$$

Значение KG судна рассчитывается по формуле

$$KG = \frac{\sum M_z}{W}. \quad (4)$$

Поскольку в данной работе рассматривается влияние груза на остойчивость, остальные статьи нагрузок (балласт, топливо и другие запасы) при выполнении расчетов считаются постоянными, в то время как положение ЦТ контейнеров будет меняться. Метацентрическая высота впоследствии исправляется поправками на свободную поверхность жидких запасов по установленной расчетной схеме [2].

Рассматривая формулу (3) следует отметить, что при разных аппликатах ЦТ судна, но при одинаковом водоизмещении, что соответствует принятым в данной работе условиям, аппликата метацентра (KM) остается неизменной, а значение KG , напротив, будет изменяться. Таким образом, используя формулу (3), суть рассматриваемого вопроса можно записать как

$$\Delta GM = -\Delta KG, \quad (5)$$

т. е. для оценки влияния положения ЦТ на остойчивость судна достаточно определить изменение аппликаты ЦТ (ΔKG) для данного состояния загрузки судна.

Следует разделять три значения нормированной метацентрической высоты:

- минимальное нормированное (устанавливается ИМО для контейнеровозов 0,15 м и соответствующим КО);
- эксплуатационное (устанавливается судовладельцем);
- аварийное.

Алгоритм оценки

1. Опытным путем и / или с учетом конкретных данных (вида перевозимого груза, его транспортных характеристик, схемы загрузки контейнера, высоты контейнера и т. п.), определяются экстремальные (минимальное и максимальное) значения аппликаты ЦТ контейнера (VCG_i) и их изменение (ΔVCG) относительно стандартной аппликаты ЦТ.

2. Определяются ЦТ штабелей контейнеров (KG_s) для каждого бэя по формуле (1). При этом, если изменение аппликаты ЦТ контейнеров в штабеле принимается одинаковым, то изменение KG_s штабеля будет равно изменению VCG контейнера в штабеле: $\Delta KG_s = \Delta VCG_i$. В этом случае достаточно взять из Информации об остойчивости судна имеющееся значение KG_s для данного штабеля и изменить его на значение ΔKG_s , не выполняя расчетов по формуле (1).

3. Полученные значения KG_s контейнерных штабелей вносятся в бланк расчета остойчивости или в грузовую программу.

4. Получаются измененное значение KG судна (KG') и соответствующее измененное значение метацентрической высоты (GM').

5. Сравнивая исходное значение GM и полученное значение GM' , получаем ΔGM .

Расчетный эксперимент

В данной работе для определения изменения аппликаты ЦТ (ΔKG) было рассмотрено десять вариантов типовой загрузки с двумя экстремальными аппликатами ЦТ контейнера (согласно рис. 4) контейнеровоза вместимостью 8110 ДФЭ, серия которых была построена в 2007 – 2014 гг. на судовой верфи *Mitsubishi Heavy Industries*, Япония (серия контейнеровозов С-класса компании *Mitsui O.S.K Line*), а также пять вариантов реальной загрузки контейнеровоза на 6725 ДФЭ, серия которых была построена в 2009 – 2011 гг. на судовой верфи *Mitsubishi Heavy Industries*, Япония (серия контейнеровозов М-класса компании *Mitsui O.S.K Line*). Поскольку физическая и математическая сущность расчетов одинакова для всех вариантов, такое их количество считается достаточным для оценки.

Таблица 3

Обработка вариантов загрузки для контейнеровоза на 8110 ДФЭ

Вариант загрузки	Кол-во контейнеров (ДФЭ)	Стандартная аппликата ЦТ		Аппликата 1 (–0,15 м)			Аппликата 2 (–1,06 м)		
		KG	GM	KG_s	ΔKG	GM'	KG_s	ΔKG	GM'
1	7593	20,04	1,58	19,96	0,08	1,66	19,45	0,59	2,17
2	7718	20,11	1,52	20,02	0,09	1,61	19,50	0,61	2,13
3	7144	20,25	1,40	20,17	0,08	1,48	19,60	0,65	2,05
4	7265	19,92	1,70	19,83	0,09	1,79	19,29	0,63	2,33
5	5468	19,16	2,47	19,06	0,10	2,57	18,37	0,79	3,26
6	5937	19,96	1,66	19,86	0,10	1,76	19,24	0,72	2,38
7	8050	19,21	2,43	19,14	0,07	2,50	18,68	0,53	2,96
8	7820	20,02	1,61	19,93	0,09	1,70	19,38	0,64	2,25
9	7912	18,78	2,85	18,71	0,07	2,92	18,26	0,52	3,37
10	7544	18,37	3,28	18,30	0,07	3,35	17,87	0,50	3,78

По результатам, представленным в табл. 3, составлены графики (рис. 6), на которых видно, что изменение метацентрической высоты судна в случае понижения ЦТ контейнера на 0,15 м, колеблется в пределах 0,07 – 0,1 м, а в случае понижения ЦТ на 1,06 м — в пределах 0,50 – 0,79 м. Для данного судна судовладельцем установлена минимальная эксплуатационная метацентрическая высота в 1,3 м.

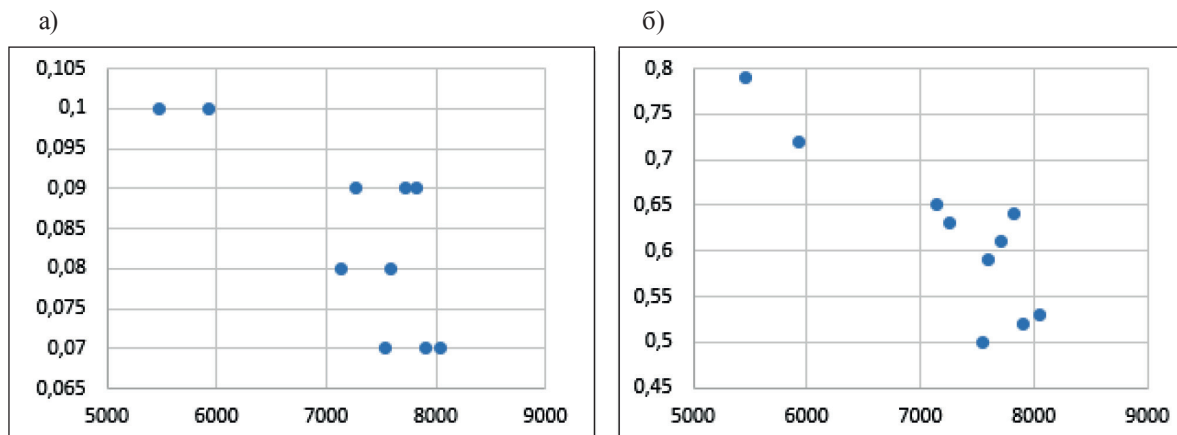


Рис. 6. Графики аппликат ЦТ по результатам, представленным в табл. 3:
а) аппликата 1 — пониженная на 0,15 м от геометрического центра контейнера;
б) аппликата 2 — пониженная на 1,06 м от геометрического центра контейнера

Таблица 4

Обработка вариантов загрузки для контейнеровоза на 6725 ДФЭ

Вариант загрузки	Кол-во контейнеров (ДФЭ)	Стандартная аппликата ЦТ		Аппликата 1 (–0,15 м)			Аппликата 2 (–1,06 м)		
		KG	GM	KG_s	ΔKG	GM'	KG_s	ΔKG	GM'
1	6231	16,22	4,48	16,18	0,04	4,52	15,80	0,44	4,92
2	5924	17,79	2,94	17,71	0,08	3,02	17,24	0,55	3,49
3	5426	17,75	3,16	17,68	0,07	3,23	17,23	0,52	3,68
4	5058	16,74	4,03	16,67	0,07	4,10	16,23	0,51	4,54
5	4798	17,03	3,78	16,96	0,07	3,85	16,54	0,49	4,27

По результатам, представленным в табл. 4, составлены графики (рис. 7), на которых видно, что изменение метацентрической высоты судна в случае понижения ЦТ контейнера на 0,15 м, колеблется в пределах 0,04 – 0,07 м. А в случае понижения ЦТ на 1,06 м — в пределах 0,44 – 0,55 м. Для данного судна судовладельцем установлена минимальная эксплуатационная метацентрическая высота в 1,2 м.

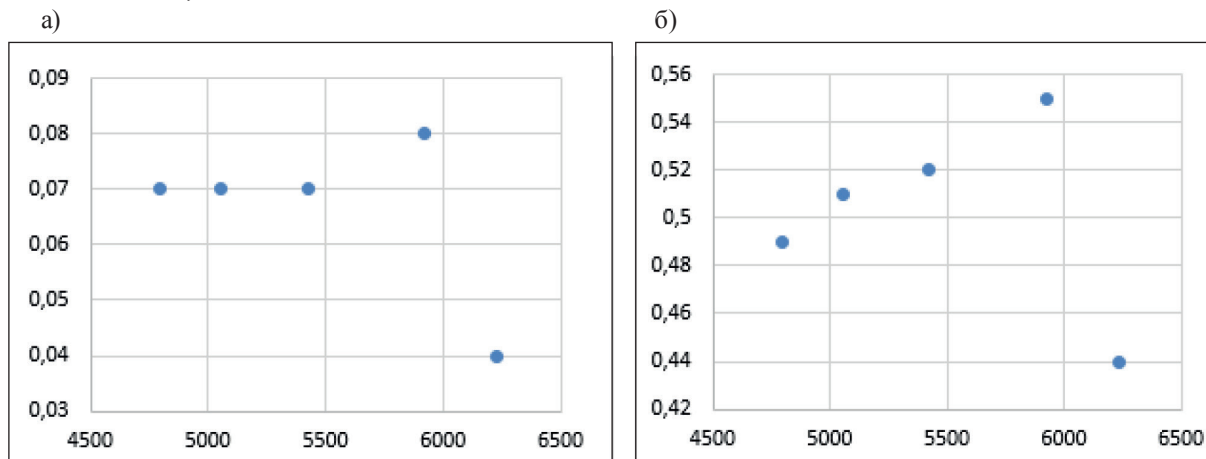


Рис. 7. Графики аппликат ЦТ по результатам, представленным в табл. 4:
а — аппликата 1 — пониженная на 0,15 м от геометрического центра контейнера;
б — аппликата 2 — пониженная на 1,06 м от геометрического центра контейнера

Практическое применение

В данной работе было установлено, что изменение аппликаты ЦТ контейнера, за исключением редких случаев, приводит к увеличению поперечной метацентрической высоты судна. Предложенная методика позволяет определить пределы возможного изменения метацентрической высоты. Если же аппликата ЦТ контейнера будет известна точно, то это позволит определить и точное фактическое значение метацентрической высоты.

На практике это позволит, в частности, более точно оперировать судовым балластом для уменьшения его количества на борту при одновременном поддержании метацентрической высоты на заданном уровне. Снижение количества неэффективного балласта позволит уменьшить водоизмещение судна, что в определенных условиях позволяет снизить расход топлива. Это, в свою очередь, будет способствовать прямой экономии средств судовладельца и снижению выброса загрязняющих веществ в атмосферу. Кроме того, уменьшенное водоизмещение выражается в меньшей осадке судна, что также может способствовать экономии средств судовладельца при прохождении судна через режимные акватории, такие, например, как Панамский и Суэцкий каналы, а также в портах, где лоцманский сбор осуществляется по максимальной осадке.

Влияние свободной поверхности на метацентрическую высоту определяется программой расчета остойчивости в текущем режиме: при любом изменении объема жидких запасов. На практике возникает необходимость компенсации нагрузок на корпус контейнеровоза посредством принятия балласта. Причем это является более приоритетной задачей, чем недопущение появления свободной поверхности. Несмотря на негативное влияние свободной поверхности на значение метацентрической высоты, нельзя однозначно считать, что частично заполненные танки приведут к ухудшению остойчивости контейнеровоза. Это связано тем, что, например, при приеме балласта в днищевые танки ЦТ судна понижается больше, чем он же повышается из-за влияния свободной поверхности [2]. Достаточный запас метацентрической высоты современных крупнотоннажных контейнеровозов позволяет допускать такую балластировку, при которой возникает свободная поверхность без угрозы уменьшения метацентрической высоты ниже допустимого значения. При этом важно учитывать нормированное значение метацентрической высоты поврежденного судна и обеспечивать его соответствие требованиям. В качестве примера рассмотрена загрузка 3 (см. табл. 4).

Расчет остойчивости контейнеровоза М-серии, основанный на том, что ЦТ контейнера расположен в его геометрическом ЦТ, дал значение $GM = 3,16$ м. Значение нормированной аварийной метацентрической высоты $GM = 2,83$ м. В рассматриваемом примере принято, что ЦТ всех контейнеров был понижен на 0,5 м. По предложенной методике рассчитана ΔGM и определена возможность уменьшения количества балласта на борту судна для поддержания $GM \geq 2,83$ м, а также рассчитан экономический эффект.

В результате расчетов получена $GM = 3,76$ м. Исходное количество балласта на борту составило 4602,4 т, исходная средняя осадка составила 10,7 м. С помощью грузовой программы можно в режиме реального времени изменять необходимые параметры и отслеживать изменение критериев остойчивости и параметров прочности корпуса [3], [4]. Так, при уменьшении балласта до 2284,3 т все параметры, в том числе и метацентрическая высота, остались в норме. В частности, новое значение GM составило 3,68 м. При этом определяющее значение аварийной метацентрической высоты составило 3,38 м против необходимых 3,37 м, средняя осадка уменьшилась до 10,4 м. Таким образом, удалось уменьшить количество балласта на 2318,1 т, а среднюю осадку на 30 см.

Уменьшение осадки дает больше возможностей для приведения судна к оптимальной посадке — для уменьшения расхода топлива. Определение влияния посадки судна на расход топлива — вопрос обширный и требует масштабных исследований. Однако некоторые исследования показали, что оптимальная посадка судна при определенных условиях позволяет экономить до 15 % топлива, и практически всегда — не менее чем 2 – 3 % [5].

На примере 14-дневного морского перехода крупнотоннажного контейнеровоза при среднесуточном расходе в режиме экономного плавания, равном 100 т / сут, и средней стоимости 1 т мазутного топлива марки IFO180 250 долл. США, можно получить экономию средств в размере

7000 – 10500 долл. США. При следовании с максимальной скоростью экономия может составить 14000 – 21000 долл. США при 2 – 3 % экономии соответственно.

Заключение

Применение расчетного алгоритма показало, что установленный классификационными обществами стандарт в отношении аппликаты ЦТ контейнера обоснован, поскольку, согласно этому стандарту, получается минимальное значение расчетной метацентрической высоты. Сделан вывод о том, что фактическая аппликата ЦТ контейнера практически всегда будет меньше стандартной. Соответственно, ЦТ судна практически всегда будет расположен ниже расчетного, что приведет к увеличению значения метацентрической высоты.

Предложенный алгоритм является универсальным и позволяет выполнять оценку, используя те значения исходных параметров, которые считаются приемлемыми в конкретной ситуации. Он может использоваться совместно с системой оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК) [6] и системой определения фактического положения центра тяжести контейнера [7], что позволит в реальном времени получать фактическое значение метацентрической высоты контейнеровоза.

В ходе выполнения расчетного эксперимента показано, что современные крупнотоннажные контейнеровозы очень часто имеют повышенную метацентрическую высоту. Дополнительное понижение ЦТ судна приводит к еще большей метацентрической высоте, чрезмерное значение которой, в свою очередь, приводит к стремительной бортовой качке и негативно сказывается на самочувствии экипажа и надежности крепления палубных контейнерных штабелей, особенно их верхних ярусов.

Учет фактического положения ЦТ контейнеров позволяет оптимизировать составление грузового плана судна [8] – [10] и балластировку судна по таким критериям как минимизация неэффективного балласта, распределение балласта для обеспечения допустимых нагрузок на корпус судна и требуемая посадка [11]. Это может способствовать снижению чрезмерной метацентрической высоты и обеспечить определенный экономический эффект, основанный на снижении расхода топлива и уменьшении портовых и канальных сборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перси Х. Д. Остойчивость морского судна (метрическая система) / Х. Дж. Перси: пер. с англ. Д. Д. Соколова. — СПб.: МОРСАР, 2007. — 198 с.
2. Царик Р. С. Влияние свободной поверхности жидких запасов на остойчивость контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Междунар. науч.-техн. конф. «Молодежь. Наука. Инновации». — Владивосток, 2016. — С. 25–31.
3. Мальцев В. А. Применение метода конечных элементов к расчету напряженно-деформированного состояния палубных перекрытий контейнеровоза / В. А. Мальцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — 6 (28). — 190–197.
4. Мальцев В. А. Программный комплекс для оценки напряженно-деформированного состояния элементов палубы контейнеровоза / В. А. Мальцев // Вестник компьютерных и информационных технологий — 2016. — № 5 (143). — С. 12–20. DOI: 10.14489/vkit.2016.05.pp.012-020.
5. Larsen N. Understanding the physics of trim: Special Greentech. Operational optimization / N. Larsen // Ship & Offshore. — 2010. — P. 36–38.
6. Царик Р. С. Система оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК) / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 2 (75). — С. 16–23.
7. Царик Р. С. Способы определения фактической метацентрической высоты контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Междунар. науч.-техн. конф. «Молодежь. Наука. Инновации». — Владивосток, 2016. — С. 19–25.
8. Соколов С. С. Математическая модель рационального размещения груза в трюмах судна / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 3. — С. 89а–92.

9. Соколов С. С. Четырехмерная модель комплектовки груза на судне / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 75–78.

10. Соколов С. С. Моделирование размещения груза при мультимодальных перевозках / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 4. — С. 98–105.

11. Царик Р. С. Обеспечение оптимальной посадки крупнотоннажных контейнеровозов для заданных условий / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Морского государственного университета. Серия: Судовождение. — 2014. — № 67. — С. 77–83.

EVALUATION OF INFLUENCE OF CONTAINER'S CENTER OF GRAVITY POSITION ON CONTAINER SHIP'S METACENTRIC HEIGHT

Height of center of gravity of container is assigned by leading classification societies as half of container's height. There is a rule, being used in calculation algorithms of container ships' cargo programs, according to which, the center of gravity of container is correspond to its geometric center.

Practically, it is very often that actual center of gravity is mismatches with geometrical, which finally leads to change of value of metacentric height of a ship, as one of stability's criteria. As a result, ship's crew get unreliable value of metacentric height. Following ballasting and bunkering operations, based on unreliable data, may lead, at least, to unreasonable costs, or even negatively effect ship's safety.

In the article algorithm of evaluation of influence of container's center of gravity position on container ship's metacentric height is proposed. Task was set to determine possible position of container's center of gravity, based on actual requirements of container shipping technology, and to evaluate influence of center of gravity shifting in specified range, by experiment-calculated method, using stability program of acting modern large container ships.

Some alternatives of container ship loading conditions were examined: actual alternatives and modelled – containing conditions, specified in the article.

During calculation experiment, the results, allowing to assume, that accepted standards related to position of center of gravity of container, were obtained. It was proved that actual position of container's center of gravity, usually leads to increase of actual metacentric height of a ship, comparing to calculated one.

It was underlined the importance for ship's crew to have reliable value of ship's metacentric height on the stage of cargo planning for safety assuring and cost efficient management of a ship.

Keywords: container ships, containers, center of gravity, eccentricity, metacentric height, stability, ballasting, safety, economic efficiency.

REFERENCES

1. Persi, H. D. *Ostojchivost morskogo sudna (metricheskaja sistema)*. Translated by D. D. Sokolova. SPb.: MORSAR, 2007.
2. Tsarik, R. S., and D. A. Akmajkin. "Vlijanie svobodnoj poverhnosti zhidkih zapasov na ostojchivost kontejnerovoza." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Molodezh. Nauka. Innovacii»*. Vladivostok, 2016: 25–31.
3. Malcev, V. A. "The use of finite element method to calculate the stress-strain of containership deck grillage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 190–197.
4. Maltsev, V. A. "Software Complex for Calculation of the Container Ship Deck Elements Deflection State." *Herald of computer and information technologies* 5(143) (2016): 12–20. DOI: 10.14489/vkit.2016.05.pp.012-020
5. Larsen, N. "Understanding the physics of trim: Special Greentech. Operational optimization." *Ship & Offshore* 2010: 36–38.
6. Tsarik, R. S., and D. Akmajkin. "Operational control system of container ship's cargo operations (OCSOCO)." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(75) (2015): 16–23.
7. Tsarik, R. S., and D. A. Akmajkin. "Sposoby opredelenija fakticheskoy metacentricheskoy vysoty kontejnerovoza." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Molodezh. Nauka. Innovacii»*. Vladivostok, 2016: 19–25.

8. Sokolov, S. S. "Simulator for the efficient cargo stowage in the vessel holds." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2010): 89a–92.
9. Sokolov, S. S. "Four-dimensional model of cargo stowing on the ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2011): 75–78.
10. Sokolov, S. S. "Modeling of cargo placing in multimodal transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4 (2012): 98–105.
11. Tsarik, R. S., and D. A. Akmaykin. "Obespechenie optimalnoy posadki krupnotonnazhnykh konteynerovozov dlya zadannykh usloviy." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Sudovozhdenie* 67 (2014): 77–83.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Царик Руслан Станиславович — аспирант.
Научный руководитель:
Акмайки́н Денис Александрович.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
rex-infinity@yandex.ru
Акмайки́н 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 10 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80
УДК 646.078

**Н. Н. Майоров,
В. А. Фетисов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ В МОРСКОМ ПАССАЖИРСКОМ ТЕРМИНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные процессы пассажирских терминалов характеризуются динамической изменчивостью, необходимостью учета разнородных параметров, критериев безопасности, анализа надежности, а также непрерывного исследования процессов обработки пассажиров. Для любого современного терминала необходимо использование инструмента для моделирования пассажирских потоков (некоторой транспортной модели) с целью получения аналитической информации, касающейся операционной деятельности для принятия решения о работе служб порта, о количестве необходимого персонала для обслуживания пассажиров, в соответствии с исходным расписанием заходов судов, о решении группы задач прогнозирования работы терминала. Объектом исследования в работе выбран Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». Особую сложность вызывает выбор математической модели и практические условия внедрения транспортной модели на конкретный объект. В статье рассмотрен подход анализа операционных процессов с использованием теории надежности, приводятся условия использования графовых моделей. Качественное применение моделей теории надежности требует большого объема статистической информации о работе терминала, что является, на практике, условием ограничения использования данного подхода. Предложен метод определения потенциальных центров скопления пассажиропотоков с использованием геометрических особенностей терминала. Для исследования пассажирских потоков предложено использование логистической цепи перемещения пассажиров. В статье предложена новая логика программного инструментария, отражающего операционные процессы в морском пассажирском терминале. В логику инструмента внесены условия фиксации сбоев и задержек. Особое внимание уделено условиям применения и внедрения разработанного инструментария в реальные процессы пассажирского терминала. Рассматриваются достоинства использования подобных систем при их внедрении на начальных

этапах эксплуатации терминала. Дополнительно в работе сделан вывод об эффективности использования подобных систем для анализа правильности организации внутреннего пространства терминала. Результатом исследования являются примеры аналитической информации по прогнозу операционной деятельности терминала, по анализу загруженности и эффективности организации.

Ключевые слова: транспортные процессы, математическое моделирование, имитационное моделирование, пассажиропоток.

Введение

Система городского пассажирского транспорта крупного города — сложная система, включающая в себя большое число взаимосвязанных и взаимодействующих между собой компонентов и различных видов транспорта. Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» — первый и единственный в Северо-Западном регионе России специализированный пассажирский порт, расположенный в Санкт-Петербурге на намывных территориях Васильевского острова. Комплекс порта включает семь причалов общей длиной 2171,06 м для приема океанских лайнеров длиной до 340 м, три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал.

Целью практического исследования является разработка инструмента моделирования пассажирских потоков внутри терминала на микроуровне и работы служб Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» [1] для создания условий для принятия решения о качественной работе порта и, к примеру, количестве необходимого персонала для обслуживания пассажиров в соответствии с исходным расписанием заходов судов. Дополнительно необходимо отметить, что подобный инструментарий можно использовать для анализа транспортного объекта на предмет безопасности, моделируя различные случаи возникновения чрезвычайных ситуаций или нахождения возможных мест скопления пассажиров внутри терминала.

Инфраструктура пассажирского терминала представляет собой четыре отдельных морских вокзала, отличающихся как по типам круизных судов, которые могут пришвартоваться, так и такими параметрами как, например, число кабин паспортного контроля. При максимальной загруженности пассажирского порта все морские вокзалы работают параллельно, при этом нагрузка на них различна. Необходимо также отметить, что у них есть и архитектурные отличия, которые оказывают влияние на организацию пассажирских потоков. Архитектурные особенности имеют важную роль при практической реализации имитационной модели в программной среде.

Согласно источнику [1], количество пассажиров круизных судов с каждым годом увеличивается. Только в 2016 г. наблюдалось снижение данных параметров на 2 – 3 %. На это снижение повлияла экономическая ситуация. При этом нагрузка на службы терминала, которые обрабатывают пассажирские потоки, увеличивается. При увеличении нагрузки увеличивается и вероятность возникновения сбоя в каком-либо отдельном подразделении. Сбой может вызвать задержку по всей цепи обработки, так как структура обработки пассажиров реализуется линейными моделями.

Методы анализа работы служб терминала на основе теории надежности

Работа вокзала зависит от множества параметров, таких как наличие человеческого фактора, прохождение паспортного и пограничного контроля, состояние информационных систем, продолжительность посадки/высадки пассажиров и др. Нарушение работы одного из факторов приводит к затруднению движения пассажиропотока и нарушению целостности работы всей системы, а это, в свою очередь, ведет к потере пропускной способности и экономическим потерям. В связи с этим возникает задача исследования, планирования и оптимизации работы морского вокзала, которая достаточно трудно реализуется традиционными алгоритмическими методами. Решение этой задачи позволит ответить на вопрос о том, как повлияет изменение нагрузки на работу всех систем вокзала в комплексе, что произойдет в случае, если в несколько раз увеличится пассажиропоток, как повлияет внедрение новых служб или новый режим работы на пассажиропоток. В первую

очередь исследуется операционная надежность системы. На практике лица, принимающие решения, стремятся основываться на статистической информации по работе служб и подразделений. При наличии сбоев производится их фиксация, выполняется анализ ситуации и определяется, к примеру, интенсивность отказов. Методики сбора данных о работе элементов транспортного узла приведены в работах [2] и [3].

Для анализа надежности операционных процессов обработки пассажиров необходимо проанализировать логистическую цепь движения пассажиров. Так как она реализуется линейной структурой, пассажир перемещается от точки до точки, для оценки надежности системы используется соотношение

$$P_i(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента при обработке пассажиропотока за время t .

Для решения группы прогнозных задач необходимо проанализировать интенсивности отказов. При оценке надежности работы подразделения на основе интенсивности отказов используется следующее соотношение

$$P_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt\right), \quad (2)$$

где $\lambda_i(t)$ — интенсивность отказов в работе системы.

Интенсивность отказов соответствующей службы определяется на основе анализа работы соответствующего подразделения за определенный интервал времени в прошлом.

Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад» реализован с учетом постоянного поэлементного резервирования. К примеру, на морском вокзале № 2 построено 28 кабин паспортного контроля. Если какая-то группа выйдет из строя, то открывается возможность перенаправить пассажирские потоки к свободным кабинам. Перестройка всей схемы работы при отказах не происходит. Вероятность безотказной работы системы с поэлементным резервированием можно представить в виде

$$P_i(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=0}^{m_i} (1 - p_{ij}(t)) \right\}, \quad (3)$$

где $P_{ij}(t)$ — вероятность безотказной работы элемента системы в интервале времени $(0, t)$;

m_j — кратность резервирования элемента группы.

Оценка параметров надежности операционных процессов служб, вовлеченных в обработку пассажиров, позволяет оценить надежность и стабильность работы терминала, но не позволяет перейти на уровень анализа пассажирских потоков. Для выполнения такого анализа необходим расчет интенсивности отказов, однако его качественно можно рассчитать только с помощью анализа интенсивности пассажирских потоков.

Методы анализа пассажиропотоков внутри пассажирского терминала

Другим способом анализа работы пассажирского терминала является анализ на основе структурной схемы [4]. Данный способ, в котором использован набор векторных операторов, соответствующих каждому подразделению, вовлеченному в обработку пассажиров, позволяет получить зависимости взаимного влияния подразделений между собой. Полученную структурную схему можно преобразовать к графовому виду. На основе формулы Мейсона [4] можно получить связи между любыми двумя вершинами графа, исключив все промежуточные. Однако данный метод не позволяет учитывать характер пассажиропотока. Поскольку каждый пассажир обладает индивидуальными целевыми функциями, можно сказать, он составит свой особый путь перемещения внутри пассажирского терминала, который можно представить геометрически (рис. 1). Совокупность индивидуальных перемещений образует потенциальные центры концентрации пасса-

жиров внутри терминала. К примеру, нахождение точки концентрации пассажиропотоков может быть вычислено на основе рис. 1.

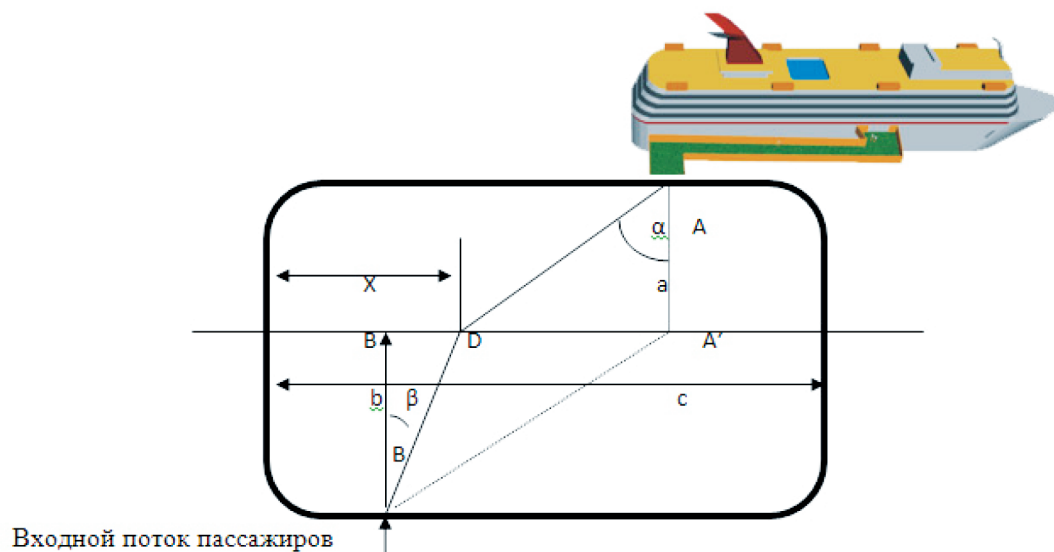


Рис. 1. Перемещение пассажира внутри терминала (вид сверху)

Согласно рис. 1, расстояние DA' будет определяться как $(c - x)$. Тогда рассматриваем два пути перемещения пассажира:

$$L_1 = \sqrt{b^2 + x^2}; \quad L_2 = \sqrt{a^2 + (c - x)^2}. \quad (4)$$

Введем параметры S_1 и S_2 , представляющие собой параметры стоимости (эффективности) перемещения пассажира внутри терминала. Тогда перемещение пассажира из точки B (вход в терминал) в A (посадка на паром) выразится следующим способом:

$$y = S_1 \sqrt{b^2 + x^2} + S_2 \sqrt{a^2 + (c - x)^2}. \quad (5)$$

Определим минимум полученной функции, для чего найдем первую производную и приравняем ее к нулю. Получим следующее соотношение, которое отражает расположение точки D . Его также можно получить и при переходе к малости угла:

$$\frac{x}{\sqrt{b^2 + x^2}} \Big/ \frac{c - x}{\sqrt{a^2 + (c - x)^2}} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (6)$$

Данный геометрический метод позволяет определить точку концентрации и, таким образом, теоретически спрогнозировать ее на основе геометрии терминала. При усложнении перемещения пассажира с учетом множества перемещений, что имеет место на практике, данный метод приводит к очень большим уравнениям, которые являются достаточно трудоемкими для расчета аналитически. Данная методика имеет хорошие результаты при оценке перемещения небольшого числа пассажиров, но современные условия требуют прогнозирования любых перемещений, не ограничиваясь только определенными пассажирами.

Главная проблема, возникающая при моделировании движения пассажира, заключается в сложности воссоздания правдоподобного поведения. Пассажир перемещается, руководствуясь личностными целями. В модель перемещения пассажира необходимо включить случайные цели перемещений, которые могут возникнуть в случайные моменты времени. Можно выполнить анализ на основе перечисления всех целей перемещения пассажиров в терминале, но тогда при моделировании возникнет задача закрепления конкретных целей за определенным пассажиром. Данный путь сведет задачу к перебору различных вариантов.

На практике для моделирования пассажиропотоков основываются на различных физических моделях. Классический подход подразумевает представление потока пассажиров, к примеру, в виде некоего вещества, состоящего из крупных объектов в определенных границах. Данный поток характеризуется определенным набором параметров. Необходимо найти такую модель, которая будет, с одной стороны, правильна в реализации, а с другой стороны, будет воспроизводить близкое к реальным процессам поведение пассажиров. При выборе модели пассажирского терминала необходимо определить ряд таких параметров, как выбор микро- или макроскопического уровня пассажирского терминала. Выбор уровня будет определять количество пассажиров, участвующих в моделировании. На микроскопическом уровне возможно описать отдельные последовательности перемещений отдельными пассажирами. В этом случае появляется возможность промоделировать отдельные сценарии. На макроскопическом уровне невозможно выделить отдельного пассажира. На данном уровне объектами исследования являются пассажирские потоки, которые можно структурно представить в форме раскрашенных графов.

При разработке имитационной модели необходимо заложить свойства детерминированной или стохастической модели. В детерминированной модели все возможные перемещения и реакции пассажира определены. В стохастической модели пассажир может по-разному реагировать на одну и ту же ситуацию. Фактически пассажир может быть представлен некоторым агентом [5] – [7]. Индивидуальное поведение каждого агента образует глобальное поведение моделируемой системы.

Так как каждый пассажир находится в окружении других пассажиров, на него это оказывает дополнительное воздействие. Пассажир подчиняется правилам и воздействию на него со стороны других пассажиров и со стороны инфраструктуры пассажирского терминала. Решение пассажира принимается в зависимости от размера результирующей величины суммы сил, действующих на него. К примеру, при наличии очереди на регистрации, пассажир, при наличии времени, может переместиться движимый другой целью, к примеру, к газетному киоску, и потом вернуться к первоначальной цели.

При моделировании необходимо стремиться к «реализму» работы модели. Модель с высокой степенью точности будет стараться реализовать движение потока с максимально приближенными к реальности алгоритмами выбора решений, пути и т. п. Модель с низкой степенью точности может быть вовсе лишена какой бы то ни было интеллектуальности. Первая модель ведет к большей сложности, росту числа переменных и увеличению времени ответа, так как при этом будет обрабатываться большое число данных. Модель с более низкой точностью может быть легче реализована, быстрее работать, если учтены ошибки и погрешности.

Среди существующих моделей пешеходных потоков можно выделить такие как модель притягивающихся сил, модели, использующие теорию очередей для описания движения пешеходов с использованием вероятностных функций, модели «клеточные автоматы», газокинетические модели, модель социальных сил [8] – [12]. Данные модели основываются на специализированных математических моделях пассажирских потоков. Необходимо также отметить, что существуют расчетные модели, при использовании которых большая часть параметров один раз рассчитывается на основании данных практического эксперимента. Составляются табличные зависимости пассажиропотока. В дальнейшем эти данные используются для описания движения пешеходного потока и могут вводиться как исходные данные.

Практическое моделирование операционных процессов и пассажиропотоков в морском пассажирском терминале

Отечественный и зарубежный опыт доказал эффективность применения имитационного моделирования для принятия грамотных решений в сфере транспорта. Необходимо отметить, что каждый транспортный объект обладает уникальными характеристиками и особенностями протекания внутренних и внешних процессов. На рынке программных систем для моделирования транспортных процессов не существует универсального инструментария, который

бы одновременно подходили для различных транспортных объектов, и для различных видов транспорта.

Традиционное проектирование морских пассажирских терминалов производится с учетом следующих этапов:

1-й этап — моделирование, как правило, применяется лишь на последних этапах проектирования;

2-й этап — расчет пропускной способности производится по эмпирическим правилам, т. е. с использованием электронных таблиц, справочников или нормативных источников;

3-й этап — при моделировании прорабатывается только ограниченное число сценариев;

4-й этап — моделирование уже готового рабочего проекта терминала с целью его тестирования и подтверждения перед началом реализации. При этом если на этапе выявляются недочеты и «узкие места», то, как правило, для серьезных изменений времени уже нет.

Имитационная модель должна быть реализована на начальных этапах проработки проекта терминала [4], [5] и использоваться параллельно реализации проекта. После завершения строительства терминала созданная имитационная модель с учетом конструктивных доработок должна преобразоваться в транспортную модель. Транспортная модель на основе имитационной позволит решать следующие задачи.

1. Расчет параметров пропускной способности пассажирского терминала.

2. Определение числа необходимых каналов / ресурсов обслуживания в соответствии с будущим спросом на паромные перевозки.

3. Моделирование различных вариантов конфигурации терминала и оценка их влияния на пассажирские потоки.

4. Моделирование поведения пассажиров, пользующихся услугами магазинов и точек питания, в целях оптимизации расположения зон торговли.

5. Моделирование возникновения чрезвычайных ситуаций и проведение анализа на уязвимости транспортного объекта.

Рассмотрим, к примеру, анализ операционной концепции с точки зрения максимальной пропускной способности. Для определения максимальной пропускной способности при расширении новых паромных судов на линии либо при увеличении числа пассажиров на рейсе необходимо использование моделирования. Анализ результатов моделирования на основе показателей позволяет определить:

- длину очередей на участках обслуживания;
- время ожидания на участках обслуживания;
- анализ потоков пассажиров;
- использование / занятость площадей терминала;
- эффективность обслуживания;
- пропускную способность;
- общее время процессов обслуживания.

Таким образом, можно достичь обеспечения стабильности операционных процессов. По итогам анализа появляется возможность выявления перегруженных участков.

При создании имитационной модели для максимально реалистичного отражения необходимо сосредоточиться на ключевых моментах. Для максимальной приближенности к реальности требуется калибровка имитационной модели. Для обеспечения требуемой точности результатов различные анализируемые области пассажирского терминала могут отличаться по уровню детализации.

На первом этапе исследования была выбрана математическая модель и прописаны алгоритмы работы терминала для точного описания процессов пассажирского терминала. За основу был выбран аппарат систем массового обслуживания и методология агентного моделирования. Система массового обслуживания включает несколько основных элементов: входящий поток, очередь для прохода контрольно-пропускного пункта, обслуживающее устройство (рамка металло-

искателя и рентгеновский сканер), очередь для прохода секторов пограничного контроля, обслуживающее устройство (металлодетекторы, интроскопы) и выходящий поток. С каждым из них связан ряд возможных допущений относительно протекания процессов обслуживания. Для моделирования использовалась библиотека Any Logic Pedestrian Library. В моделях, созданных с помощью Pedestrian Library, пассажиры передвигаются непрерывно, реагируя на различные виды препятствий [12] – [14]. Пассажиры моделируются как взаимодействующие агенты со сложным поведением. Для быстрого описания потоков Pedestrian Library обеспечивает высокоуровневый интерфейс в виде блочной диаграммы. Среда Any Logic [15] позволяет выполнить моделирование не только с использованием Pedestrian Library, но и на основе как дискретно-событийного, так и агентного моделирования. Недостатком второго метода является невозможность создания трехмерной реализации.

На втором этапе исследования была построена логистическая цепь движения пассажиров в порту, реализованная в форме ориентированного графа (рис. 2). Данная модель позволяет прогнозировать общее время прохождения пассажира на всех этапах обслуживания.

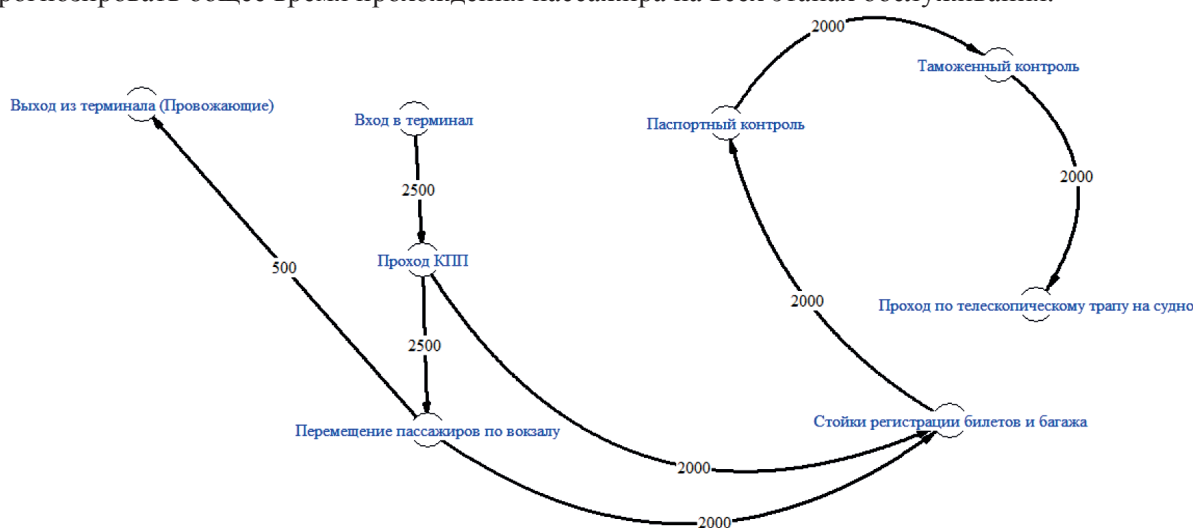


Рис. 2. Логистическая цепь движения пассажиров в порту

После разработки логистической цепи движения пассажира необходимо разработать структурную схему имитационной модели и установить взаимосвязь между элементами, составляющими систему обработки пассажира (рис. 3).

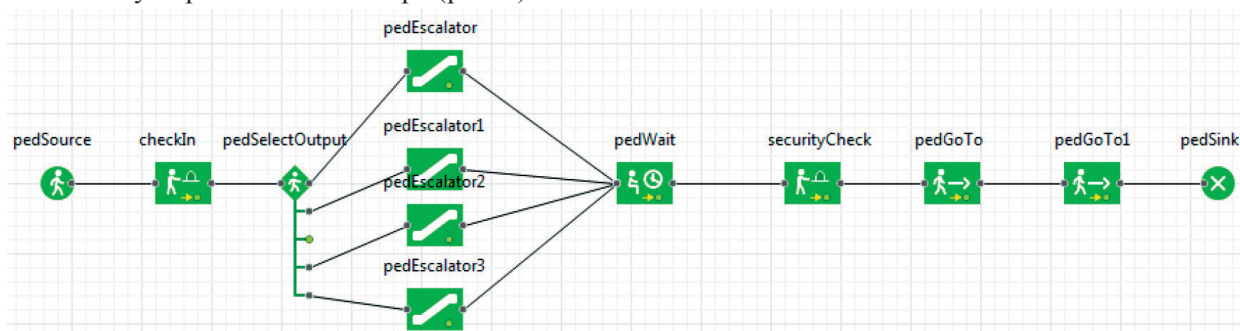


Рис. 3. Логика имитационной модели работы пассажирского порта (фрагмент)

При изучении архитектуры Пассажирского порта Санкт-Петербурга «Морской фасад» было принято решение о прорисовке порта вручную с учетом архитектурных пропорций строения. Следующим этапом явилось выполнение моделирования на основе реального расписания заходов пассажирских судов (рис. 4 и 5).

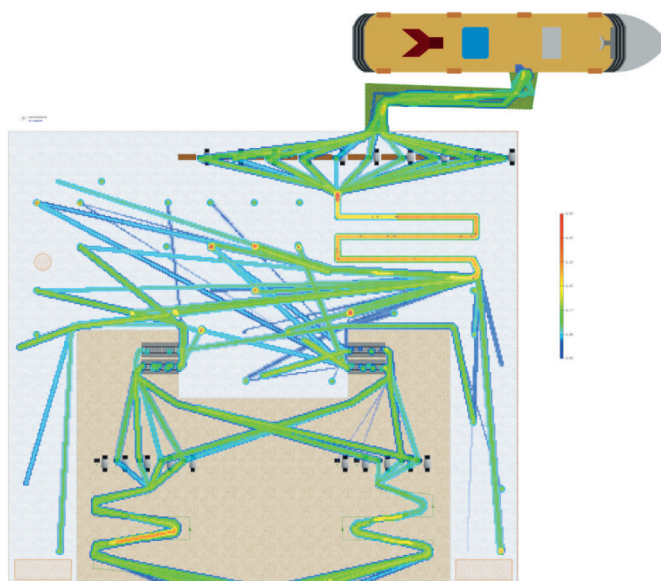


Рис. 4. Плотность пассажирских потоков



Рис. 5. Трехмерная реализация модели

В результате моделирования получился большой объем аналитической информации по пассажиропотокам и времени операционных параметров загрузки порта. На каждом этапе обработки пассажира производится анализ полученного времени обслуживания и его сравнение с эталонным. К примеру, на прохождение досмотра на одного пассажира выделяется не более трех минут. При выходе за данный интервал времени система формирует информационное сообщение для лица, принимающего решение. После завершения моделирования лицо, принимающее решение, может провести анализ возможных сбоев в операциях обработки пассажиров. Интенсивность пассажиропотоков за определенный интервал времени представлена на рис. 6.

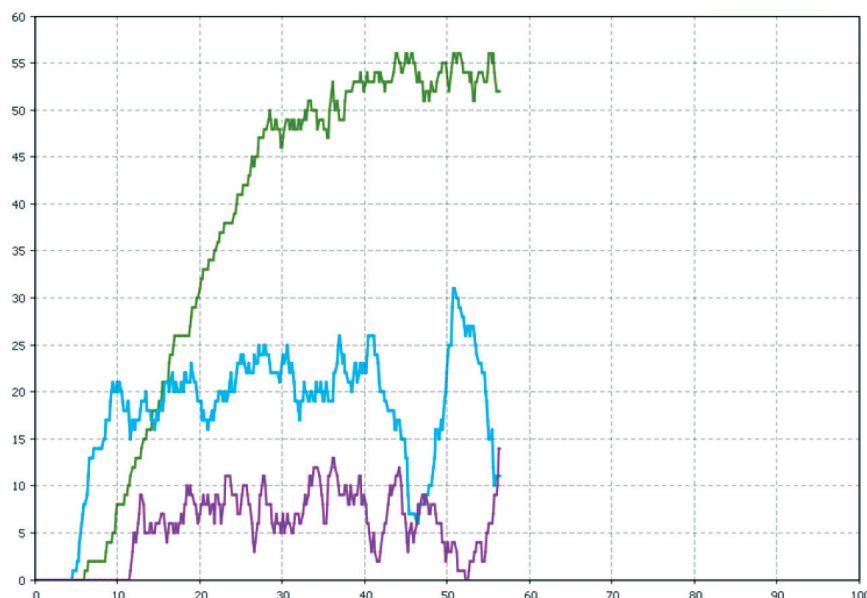


Рис. 6. Интенсивность пассажиропотоков морского пассажирского терминала

Инструментальное средство учитывает особенности всех важнейших элементов морского вокзала, влияющих на пассажиропоток как на микро-, так и на макроуровне. Однако необходимо отметить, что одной из основных сложностей на пути решения задачи моделирования всего комплекса причалов является трудоемкость сбора данных о пассажиропотоках всей системы.

Выводы

1. В статье рассматривается методика исследования операционных процессов морского пассажирского порта с использованием имитационного моделирования. Обосновываются условия анализа работы служб терминала на основе теории надежности и указывается необходимость анализа интенсивности пассажирских потоков. Качественное применение моделей теории надежности требует большого объема статистической информации по работе терминала, что является условием ограничения использования данного подхода. Дополнительно указывается на наличие конструктивных особенностей терминала, которые могут быть источниками возникновения задержек или «слабых мест» в обработке пассажиров.

2. В работе предлагается математическая модель нахождения концентрации пассажиропотока с использованием геометрических параметров терминала. Подобная модель может использоваться как для нахождения точки размещения служб терминала, так и для прогнозирования потенциальных центров скопления пассажиров. В статье обосновываются границы применимости данной модели.

3. С целью создания отдельной транспортной модели обосновывается применение имитационного моделирования как инструментария, позволяющего провести многокритериальный анализ операционной деятельности пассажирского порта. В работе реализована логистическая цепь движения пассажиров, представлена логика программного инструментария, отражающего операционные процессы. В модель включено агентное поведение пассажиров, реализующее случайные процессы и условия фиксации задержек в обслуживании пассажиров для лица, принимающего решение. В результате моделирования получены аналитические параметры работы служб и подразделений. Разработанная имитационная модель обладает не только высокой точностью моделирования (позволяет получать количественные характеристики на каждом этапе обслуживания пассажиров), но и обеспечивает прогнозирование пассажиропотока на несколько часов вперед на основе реальных данных. После завершения моделирования лицо, принимающее решение, может выполнить анализ возможных сбоев в операциях обработки пассажиров.

4. Дополнительно разработанный инструментарий позволяет решить круг экономических вопросов, касающихся эффективности организации внутреннего пространства пассажирского терминала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пассажирский порт Санкт-Петербург [Электронный ресурс]: Официальный сайт. — Режим доступа: <http://www.portspb.ru/> (дата обращения — 11.10.2016).
2. Майоров Н. Н. Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2012. — 185 с.
3. Майоров Н. Н. Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 7–15.
4. Сольнищев Р. И. Модели и методы принятия проектных решений / Р. И. Сольнищев. — СПб: ЛЭТИ, 2010. — 68 с.
5. Понятовский В. В. Морские порты и транспорт (эволюция) / В. В. Понятовский. — М.: МГАВТ, 2006. — 429 с.
6. Handbook of Terminal Planning / edited by J. W. Böse. — Springer Science+Business Media, LLC, 2011. — 456 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.
7. Кириченко А. В. Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. — 228 с.
8. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении / Д. Ю. Каталевский. — М.: Изд. дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 496 с.
9. Helbing D. Self-organizing pedestrian movement / D. Helbing, P. Molnár, I. Farkas, K. Bolay // Environment and Planning B: planning and design. — 2001. — Vol. 28. — No. 3. — Pp. 361–383. DOI: 10.1068/b2697.

10. Gipps P. G. A micro-simulation model for pedestrian flows / P. G. Gipps, B. Marksjö // Mathematics and computers in simulation. — 1985. — Vol. 27. — Is. 2–3. — Pp. 95–105. DOI:10.1016/0378-4754(85)90027-8.
11. Akopov A. S. Simulation of human crowd behavior in extreme situations / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan // International Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2012. — Vol. 79. — No. 1. — Pp. 121–138.
12. Helbing D. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations / D. Helbing, I. Farkas, P. Molnar, T. Vicsek // Pedestrian and evacuation dynamics. — 2002. — Vol. 21. — № 2. — Pp. 21–58.
13. Бекларян А. Л. Имитационная модель поведения толпы в среде разработки AnyLogic / А. Л. Бекларян // Вестник Бурятского государственного университета. — 2015. — № 9. — С. 40–53. DOI: 10.18097/1994-0866-2015-0-9-40-53.
14. Jugović A. Organization of Maritime Passenger Ports / A. Jugović, V. Mezak, G. Nikolić // Pomorskizbornik. — 2006. — Vol. 44. — Is. 1. — Pp. 93–104.
15. Anylogic [Электронный ресурс]: Офици. сайт. — Режим доступа: www.anylogic.ru (дата обращения – 20.10.2016).

RESEARCH OF OPERATIONAL PROCESSES PASSENGER SERVICES IN THE MARINE PASSENGER TERMINAL USING SIMULATION

Modern marine passenger terminals are characterized by dynamic processes variability, the need to consider diverse options, taking into account the criteria of safety, reliability analysis, continuous research passenger processing. For any modern marine terminal is necessary to use the tool to simulate passenger flows (a transport model) to obtain analytical information for decision-making on the work of port services, the number of personnel required for passenger service, in line with the original schedule of cruise ships, about the decision of the group forecasting problems of the terminal. The object of study of St. Petersburg passenger port "Marine Facade" was selected. Of particular difficulty is the choice of the mathematical model and the practical conditions for the implementation of the transport model to a particular transport object. In the article the approach of analysis of operational processes using reliability theory, given the conditions of use of graph models. Qualitative application reliability theory models require a large amount of statistical information on the terminal, that is, in practice, the condition for limiting the use of this approach. This paper proposes a method to identify potential centers of passenger traffic congestion using geometric features of the terminal. The use of supply chain movement of passengers have been proposed for the study of passenger flows. The paper proposes a new logic software tools reflecting the operational processes in the marine passenger terminal. The logic of the instrument conditions listed fixing glitches and delays. Particular attention is paid to the conditions of use and implementation of tools developed in the actual processes of the passenger terminal. The paper discusses advantages of using such systems for their introduction in the early stages of operation of the terminal. In addition, the conclusion about the effectiveness of such systems for the analysis of the correctness of internal space of the marine terminal. The study represents an example of analytical information on the forecast of the terminal operations, the analysis of the workload and efficiency of the organization marine terminal.

Keywords: transport processes, mathematical modeling, simulation, passenger flow simulation.

REFERENCES

1. Passazhirskij port Sankt-Peterburg. Web. 11 Oct. 2016 < <http://www.portspb.ru/> >.
2. Majorov, N. N., and V. A. Fetisov. *Prakticheskie zadach imodelirovanija transportnyh sistem*. SPb.: Izd-vo GUAP, 2012.
3. Majorov, Nikolai Nikolaevich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Research operational management container terminal based on the transport model and simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 3(37) (2016): 7–15.
4. Solnicev, R. I. *Modeli i metody prinjatija proektnyh reshenij*. SPb: LJeTI, 2010.
5. Ponjatovskij, V. V. *Morskie porty i transport (jevoljucija)*. M.: MGA VT, 2006.
6. Böse, Jürgen W., editor. *Handbook of Terminal Planning*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.
7. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznecov, O. A. Razhev, et al. *Vvedenie v transportnuju logistiku*. SPb.: Izd-vo GUAP, 2011.

8. Katalevskij, D. Ju. *Osnovy imitacionnogo modelirovanija i sistemnogo analiza v upravlenii*. M.: Izdatelskijdom «Delo» RANHiGS, 2015.
9. Helbing, D., P. Molnár, I. Farkas, and K. Bolay. “Self-organizing pedestrian movement.” *Environment and Planning B: planning and design* 28.3 (2001): 361–383. DOI: 10.1068/b2697.
10. Gipps, Peter G., and B. Marksjö. “A micro-simulation model for pedestrian flows.” *Mathematics and computers in simulation* 27.2–3 (1985): 95–105. DOI:10.1016/0378-4754(85)90027-8.
11. Akopov, Andranik S., and Levon A. Beklaryan. “Simulation of human crowd behavior in extreme situations.” *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 79.1 (2012): 121–138.
12. Helbing, Dirk, I. Farkas, P. Molnar, and T. Vicsek. “Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations.” *Pedestrian and evacuation dynamics* 21.2 (2002): 21–58.
13. Beklaryan, Armen L. “Simulation model of crowd behavior in the IDE Any Logic.” *The BSU Bulletin* 9 (2015): 40–53.
14. Jugović, Alen, Vlado Mezak, and Slavko Lončar. “Organization of Maritime Passenger Ports.” *Pomorskizbornik* 44.1 (2006): 93–104.
15. Anylogic. Web. 20 Oct. 2016 <www.anylogic.ru>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
sciencesuai@yandex.ru
Фетисов Владимир Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
Fetl@aanet.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Majorov Nikolaj Nikolaevich —
PhD, associate professor.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
sciencesuai@yandex.ru
Fetisov Vladimir Andreevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
Fetl@aanet.ru

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2016 г.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95

УДК 528.475

Ю. Г. Фирсов

СОВРЕМЕННАЯ БАТИМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В КОНТЕКСТЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ГРАНИЦ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА В АРКТИКЕ

Рассмотрены результаты батиметрической съемки, выполненной в Северном Ледовитом океане арктическими государствами с использованием современных гидрографических технологий, в течение последних 10 – 15 лет. Отмечается, что интерес к исследованию рельефа дна Центрального Арктического бассейна возник в последнее десятилетие в связи с проблемой определения внешней границы континентального шельфа в Арктике. В этот период арктические государства вступили в гонку по обоснованию внешних границ своего континентального шельфа. Точная батиметрическая съемка является основой для обоснования положения зоны основания континентального склона и поиска точки максимального изменения градиента на батиметрическом профиле — точки подножия континентального склона — основы для построения формульных линий рельефа в соответствии с требованиями ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву. Одна из ограничительных линий связана с точным установлением положения изобаты 2500 м, что также требует проведение детальной съемки с использованием современных гидрографических технологий.

Дан краткий исторический обзор исследований рельефа Северного Ледовитого океана. Подчеркивается российский приоритет, отраженный в большинстве топонимов форм подводного рельефа, названных в честь отечественных исследователей, а также созданных батиметрических картах. Приводится обзор батиметрических работ, выполненных Данией, Канадой, США и Россией в период 2000 – 2016 гг., с использованием современных гидрографических технологий: многолучевых эхолотов и средств спутникового позиционирования, а также геоинформационного программного обеспечения. Отмечается, что эти работы были направлены в первую очередь на обоснование внешних границ континентального шельфа приарктических государств. Обсуждаются версии цифровой международной батиметрической карты Северного Ледовитого океана и источники данных, положенные в ее основу. Показаны имеющиеся в свободном доступе источники батиметрических данных и цифровые модели рельефа дна. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день рельеф дна Амеразийского бассейна Северного Ледовитого океана является наиболее изученным. Приведены основные полученные результаты и оценка качества подводного рельефа по результатам многолучевой съемки на больших глубинах.

Ключевые слова: внешняя граница континентального шельфа, ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву, Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана (IBCAO), подножие континентального склона, площадная съемка дна, многолучевой эхолот, цифровая модель рельефа дна, качество батиметрической съемки.

Введение

До середины XX в. глубоководный Арктический бассейн Северного Ледовитого океана (СЛО), благодаря специфике климатических условий, труднодоступности и ограниченному времени проведения исследований, оставался во многом «белым пятном» на карте Земли. Начальный этап изучения СЛО во второй половине XX в. был во многом связан с решением военных задач в Арктике. На этом этапе был собран обширный и разнородный фактический материал, позволивший вручную создать батиметрические карты, которые в целом правильно отражают основные морфоструктуру Центрального Арктического бассейна.

В начале XXI в. в СЛО был выполнен ряд исследований как в научных целях, так и для решения задач установления границ расширенного континентального шельфа согласно Конвенции ООН по морскому праву. Важнейшей составляющей проводимых исследований является батиметрическая съемка. Целью данной работы является анализ результатов съемок, выполненных за последние годы. В ней сделан обзор современных батиметрических материалов, полученных

с использованием новых технических средств — многолучевых эхолотов и спутниковых систем позиционирования, показано применение информационных технологий для представления результатов съемок, а также представлены батиметрические базы данных, имеющиеся в открытом доступе в сети Интернет.

Краткий исторический очерк изучения рельефа дна Северного Ледовитого океана

До середины XX в. исследования Арктического глубоководного бассейна носили эпизодический характер, и по оценке специалистов (на основании одиннадцати глубин, измеренных Ф. Нансеном на шхуне «Фрам»), в рельефе бассейн представлял собой единую глубоководную впадину. Начало исследований Арктического бассейна было положено в конце 40-х гг. XX в. советскими высокоширотными воздушными экспедициями под руководством Я. Я. Гаккеля, и к 1956 г. этими экспедициями было измерено более 400 глубин. Начиная с 1954 г. вследствие проведения работ советских полярников на дрейфующих станциях база батиметрических данных бассейна была значительно увеличена. По результатам исследований советских полярников был открыт хребет Ломоносова с минимальными глубинами 1005 м и изданы батиметрические карты, которые коренным образом изменили представления о рельефе дна бассейна [1], [2].

В 50-х гг. XX в. исследования центральной Арктики проводились также американскими полярниками, результатом которых было открытие отрога Марвина, а в 1957 – 1858 гг. и хребта Альфа [3], [7]. В 1959 г. зарубежными специалистами была выполнена подробная съёмка рельефа дна Чукотского поднятия. С конца 50-х гг. XX в. Военно-морские силы США проводили исследования Арктического бассейна с использованием атомных подводных лодок (АПЛ). Маршрутные работы выполнялись в основном в Евразийском суббассейне СЛО [3] – [5]. К 1960 г. отечественными и зарубежными экспедициями по разным оценкам было измерено от 7000 до 20000 глубин, расположенных крайне неравномерно по всему Арктическому бассейну [1]. Для того времени это был достаточно большой объём батиметрических данных, который позволял определить основные формы рельефа, их границы, наиболее общие черты морфологии и некоторые морфометрические характеристики форм.

Батиметрические карты, составленные Б. Хейзенем, М. Тарп и М. Юингом, включая карту Арктического бассейна, долгое время оставались основой для исследования рельефа дна Мирового океана. Объемное изображение рельефа дна Арктического бассейна создано этими авторами в виде физиографической карты издания 1971 г. [6] (рис. 1), а батиметрическая карта СЛО была издана в 1975 г. [7].

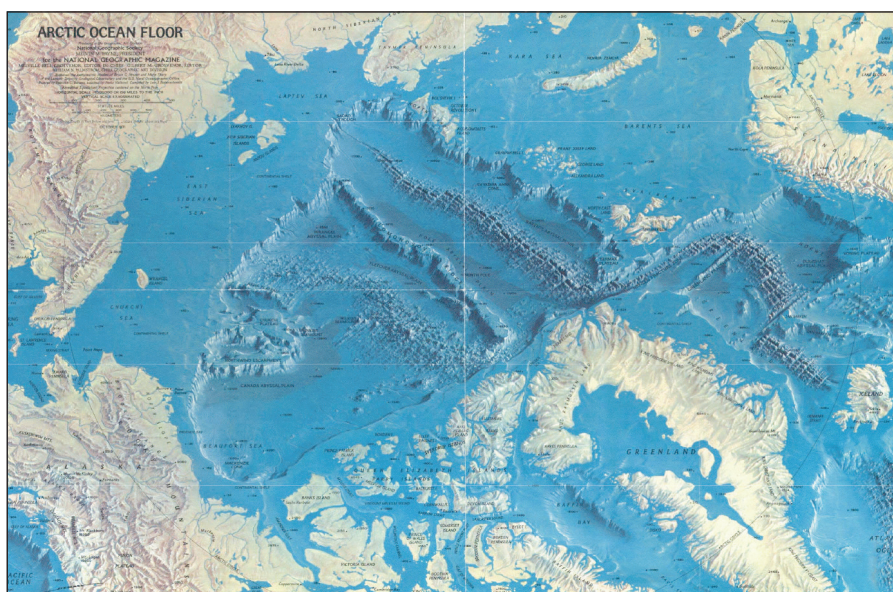


Рис. 1. Фрагмент карты рельефа дна Арктического бассейна, 1971 г.

Последующие отечественные и зарубежные исследования значительно увеличили базу батиметрических данных Арктического глубоководного бассейна. Из зарубежных работ того времени следует отметить экспедиции канадских полярников на хребтах Ломоносова (Лорекс-79) и Альфа (Цезарь-83), результаты которых позволили значительно уточнить рельеф хребтов приканадской части бассейна [5], [8].

Широкомасштабные систематические исследования Арктического бассейна проводились отечественными учеными на протяжении более 35 лет, начиная с 1961 г. Съёмка рельефа дна проводилась авиадесантным способом с дрейфующих льдов, подводных и надводных судов. В течение периода исследований практически вся акватория Арктического бассейна (более 80 % площади) была обследована высокоточным систематическим промером. Эхолотом со льда было измерено 21120 глубин, сейсмозондированием со льда — 17426 глубин, промер с подводных лодок составил более 92000 лин. км. Объём базы данных был значительно увеличен за счёт маршрутного промера, выполненного надводными судами и АПЛ России, а также дрейфующими станциями «Северный Полюс». К настоящему времени подавляющее большинство этих материалов открыто для использования. Детальное описание зарубежных и отечественных работ приведено в монографии [9].

В Арктическом бассейне для объективной оценки рельефа и подробного отображения его на картах наиболее приемлемыми являются известные в гидрографии морфологические принципы анализа результатов исследований [10], основанные на использовании структурных линий рельефа, при построении которых образуется структурный каркас. Следует, однако, заметить, что при дефиците реальных измерений глубин морфологический анализ приобретает иногда субъективный характер.

По результатам отечественных и зарубежных работ Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации совместно с ВНИИОкеангеология в 1998 г. вручную была подготовлена батиметрическая карта с сечением рельефа 200 м на глубоководную часть Арктического бассейна [11]. В дальнейшем с учетом новых батиметрических данных, позволивших откорректировать рельеф дна некоторых районов бассейна, в 2002 г. в УНиО была подготовлена новая батиметрическая карта «Центральный Арктический бассейн» масштаба 1:2500000 (на четырех листах), адмиралтейский номер 91115 [12]. В дальнейшем в 2013 г. эта карта была переиздана с учетом новых отечественных данных, полученных в 2010 и 2011 гг. с использованием многолучевых эхолотов [13]. Необходимо отметить, что Россия имеет очевидный приоритет в исследованиях Арктического бассейна. Так, в Каталоге названий форм подводного рельефа (Газетёре) в Генеральной батиметрической карте океанов — ГЕБКО (GEBCO) из 177 названий форм подводного рельефа СЛО в честь российских исследователей — ученых и гидрографов, указаны 62 объекта [14].

С начала XXI в. в СЛО начали выполняться несколько проектов батиметрической съемки рельефа дна уже с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ). Были продолжены рейсы германского научно-исследовательского ледокола «Polarstern». С 2001 г. начал работу ледокол береговой охраны США «Healy», а с 2007 г. — шведский ледокол «Oden». Съёмки, выполненные в Центральном Арктическом бассейне, дали значительный объем достоверной и точной информации о рельефе дна. Первые интересные результаты были получены по проекту Arctic Mid Ocean Ridge Expedition (AMORE) на хребте Гаккеля в 2001 г. Совместная экспедиция в составе немецкого ледокола «Polarstern» и американского ледокола береговой охраны «Healy» выполнила батиметрическую съемку с использованием МЛЭ [15]. Появление новых точных и детальных данных о рельефе дна, а также геоинформационных компьютерных технологий позволили начать использование цифровых моделей рельефа (ЦМР) дна, что ознаменовало новый подход к созданию батиметрических карт.

Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана

Международная батиметрическая карта (The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO)) в первой версии была составлена и представлена Американскому геофизическому союзу (AGU) в конце 1999 г. [16]. Первая версия включала ЦМР дна СЛО в полярной стереографической проекции с размерностью грида $2,5 \times 2,5$ км [16], [17]. ЦМР дна была составлена на основе цифровой

базы данных, которая аккумулировала в себе все доступные на тот момент данные о батиметрии СЛО в виде отметок глубин и их координат. Эти данные включали не только промер, выполненный в предшествующие годы с использованием средств и методов, которые значительно различались по точности, но и новейшие данные, полученные в последнее десятилетие с использованием спутниковых средств позиционирования и результатов съемки рельефа с помощью МЛЭ.

В районах, где отсутствовали реальные измерения глубин, были использованы данные с имеющихся навигационных карт путем оцифровки изобат и отличительных глубин. В базу данных были включены ставшие доступными для международной научной общественности данные промера с АПЛ по проекту SCICEX [18], а также использованы результаты съемок с МЛЭ в транс-арктической экспедиции «HOTRAX 2005» (Healy-Oden Trans-Arctic Expedition) в приполюсной части хребта Ломоносова [19]. Всего в первой версии ИВСаО было использовано 1 643 477 отметок глубин и 1 948 749 глубин путем оцифровки изобат [16]. Новейшие батиметрические данные охватывали главным образом центральный район СЛО. Несмотря на большой охват в базе данных, существовали акватории, в которых ЦМР была построена на основе оцифровки изобат с морских навигационных карт и мелкомасштабных батиметрических карт. К таким районам относилось также большинство районов российского сектора Арктики. В частности, была использована батиметрическая карта СЛО масштаба 1:5 000 000 на бумажной основе, изданная ГУНиО МО РФ [11]. Источники информации и анализ первой версии батиметрической карты ИВСаО детально рассмотрены в работе [16]. Описание батиметрии и морфологии дна СЛО, в соответствии с первой версией модели ИВСаО, представлено в работе [20].

Батиметрическая съемка СЛО с ледокола береговой охраны США «Healy»

Работы в американской зоне СЛО с 2003 г. были направлены на решение задач обоснования внешней границы США в СЛО [21]. Кроме работ на хребте Гаккеля в 2001 г., ледокол береговой охраны «Healy» выполнял многолучевую съемку рельефа в Центральном Арктическом бассейне, включая котловину Амундсена и приполюсный район хребта Ломоносова (2005 г.) [19], а также в Канадской котловине и на Чукотском плато. Экспедиционные рейсы состоялись в 2003, 2004 и 2007 гг. [22] – [24]. В дальнейшем работы «Healy» в американской зоне СЛО были продолжены в 2008, 2009 и 2011 гг. [25] – [27].

Существенное улучшение морфологии дна СЛО получено на континентальном склоне к северу от Аляски. Площадная съемка рельефа многолучевым эхолотом была выполнена в этом районе в период 2003 – 2007 гг. и в 2011 г. с ледокола береговой охраны США «Healy» [22] – [27]. Все батиметрические материалы выложены в свободном доступе в сети Интернет, что обеспечивает возможность использования современных геоинформационных технологий трехмерной визуализации для просмотра и анализа рельефа. Морфология участка континентального склона Аляски в море Бофорта показана на трехмерном изображении, приведенном на рис. 2.

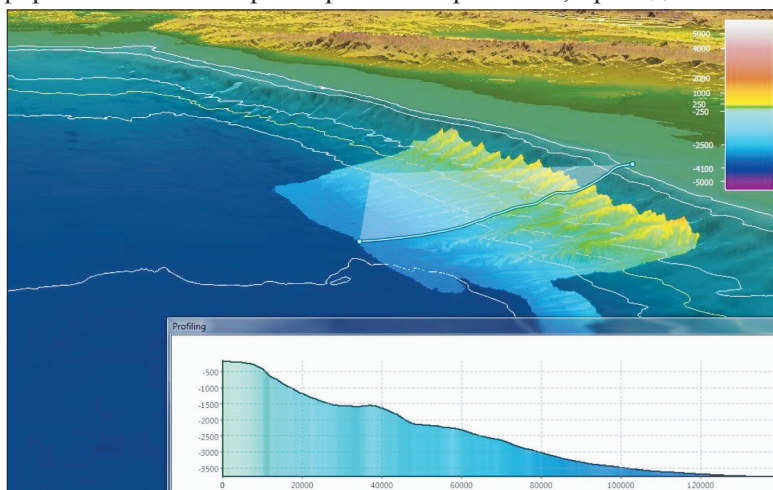


Рис. 2. Трехмерная ЦМР участка континентального склона Аляски и батиметрический профиль

Склон хребта Нортвинд и Чукотского плато также были покрыты площадной батиметрической съемкой МЛЭ, выполненной ледоколом береговой охраны «Healy» в период 2003 – 2009 гг. Трехмерное изображение ЦМР дна склона хребта Нортвинд приведено на рис. 3. Результаты многолучевой съемки показали, что склон хребта Нортвинд в направлении Канадской абиссальной равнины чрезвычайно крутой; несколько секций его имеют наклон более 10° и диапазон изменения глубин, равный 3000 м. В ходе этих рейсов были открыты неизвестные ранее в США формы рельефа [22], [27]. В частности, во время проведения рейса 2003 г. [22] была обнаружена подводная гора, получившая название *Healy*. Отметим, что данная форма рельефа показана на российской батиметрической карте, изданной в 2001 г. [12], [13]. Начиная с 2007 г. Канада приступила к работам по обоснованию границ расширенного континентального шельфа в Арктике [28]. Работы в канадской зоне СЛО — Канадской котловине — на начальном этапе (2008 – 2011 г.) выполнялись совместно с США на основе использования двухсудового варианта: канадский ледокол «Louis S. Saint Laurent» и американский ледокол «Healy» [29].

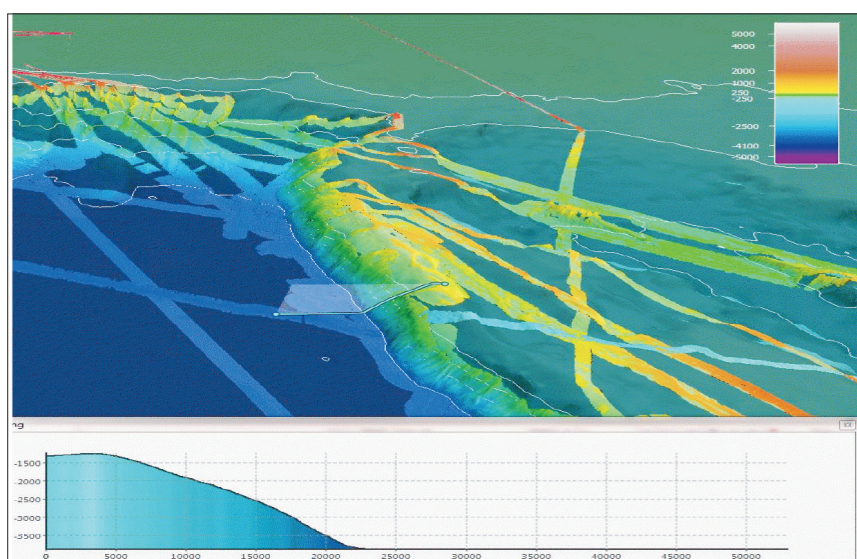


Рис. 3. Трехмерная цифровая модель рельефа участка континентального склона на хребте Нортвинд и батиметрический профиль

Начиная с 2007 г. площадная батиметрическая съемка в центральной части СЛО на хребте Ломоносова осуществлялась датско-шведско-канадской экспедицией по проекту «Lomonosov Ridge of Greenland» на шведском исследовательском ледоколе «Oden», оборудованном многолучевым эхолотом EM-122. Работы проводились в соответствии с программой обоснования расширенного континентального шельфа Гренландии и Королевства Дания в арктическом районе к северу от Гренландии [30]. Были выполнены три экспедиции: LOMROG-2007 [31], LOMROG-2009 [32], и LOMROG-2012 [33]. Съемка с помощью МЛЭ выполнялась на обоих склонах хребта Ломоносова. В процессе работ, по данным многолучевой батиметрии, оперативно создавался грид с размерностью 100 × 100 м. Всего было выполнено более 18800 лин. км многолучевой съемки в основном в односудовом варианте. Более подробный анализ батиметрических съемок, выполненных в СЛО с использованием МЛЭ с 2001 по 2009 гг., содержится в работе [34].

В 2008 – 2011 гг. работы проводились в двухсудовом варианте: исследовательский ледокол «Healy» совместно с канадским исследовательским ледоколом «Louis S. St-Laurent», оборудованным аппаратурой для выполнения многоканальной сейсмической съемки. Общая длина галсов многолучевой съемки равна 33 885 пог. км, площадь съемки — 200000 км². Всего за период 2003 – 2011 гг. съемка рельефа продолжалась 191 день, общая длина галсов составила более 50780 пог. км, а общая площадь, покрытая многолучевой съемкой, — около 320 000 км² [35].

Батиметрические данные, полученные ледоколами «Healy» (2003 – 2011 гг.) и «Oden» (2007, 2009 гг.) и другими научно-исследовательскими судами в период 2001 – 2008 гг., были использованы в новой (2008 г.), второй, версии батиметрической карты IBCAO [36]. Эти современные данные покрыли приблизительно 6 % площади новой батиметрической карты. Карта IBCAO-2, доступная для бесплатного использования в цифровой форме с гридом 2×2 км [37], составлена в полярной стереографической проекции с главной параллелью 75° на эллипсоиде WGS-84, глубины отнесены к среднему уровню моря. Основой для составления IBCAO версии 2 послужили исследования, перечень которых представлен в работе [36]. В 2005 г. электронная (растровая) версия карты «Центральный арктический бассейн» 1:2 500 000 была передана в редколлегия Международной батиметрической карты (IBCAO) [9].

Отечественные батиметрические исследования СЛО в интересах обоснования внешней границы континентального шельфа в Арктике

Для России проблема обоснования расширенного континентального шельфа в Арктике, в соответствии с положениями ст. 76 Конвенции по морскому праву, чрезвычайно актуальна. Первое российское представление на расширенный континентальный шельф в Арктике (2001 г.) было отклонено ввиду отсутствия первичных материалов батиметрической съемки. Имеющаяся в Российской Федерации батиметрическая база данных, основанная на материалах, полученных в 60- – 90-е гг. XX в., по точности и полноте не отвечает требованиям Научно-технического руководства Комиссии ООН по границам континентального шельфа [38]. В конце 2009 г. правительством РФ было принято решение о проведении экспедиционных работ в СЛО в 2010 г. с целью выполнения современной батиметрической съемки в соответствии с требованиями научно-технической революции и Стандарта Международной гидрографической организации (далее — Стандарт МГО) [39] с использованием современных технологий.

Наряду с аппаратурными средствами в современной гидрографии огромную роль играют гидрографические информационные технологии, которые обеспечивают возможность эффективного применения новейших технических средств: МЛЭ, фазовой спутниковой навигационной аппаратуры и датчиков пространственной ориентации, а также гарантируют качество на всех этапах съемки, начиная с подготовки проекта и заканчивая постобработкой результатов батиметрической съемки и представления ее конечных результатов. Анализ технологий для обеспечения батиметрических исследований СЛО, учитывающий зарубежный опыт, выполнен в работах [34], [40].

Набор технологий, необходимых для съемки рельефа дна с использованием МЛЭ ЕМ 122, включает следующие пакеты программ:

- управление съемкой в реальном времени;
- постобработка данных многолучевой съемки и построение цифровой модели рельефа;
- представление цифровых моделей рельефа на основе трехмерной визуализации;
- анализ батиметрических профилей, полученных с использованием ЦМР формирования точек подножия континентального склона и формульных линий.

На этапе подготовки к экспедиции были разработаны технологические схемы постобработки данных съемки рельефа, используемые в компьютерных информационных технологиях [41]. Эти схемы предполагают преобразование информации, получаемой в процессе съемки с учетом априорных погрешностей измерений в ЦРМ, глубины в которой оцениваются апостериорными погрешностями, получаемыми на основе строгих методов статистической обработки. При этом обеспечивается контроль качества результатов. Качество результатов площадной батиметрической съемки 2010 г. обсуждается в работах [42] и др. Выполненная батиметрическая съемка полностью отвечает требованиям Стандарта МГО. Представление результатов батиметрической съемки производилось в среде трехмерной графики пакета Fledermause. По результатам работ, выполненных в период проведения рейса 2010 г. в проекте ГИС «GeoCAR», была сформирована формульная линия Хедберга и ограничительная линия «изобата 2500 м + 100 миль». Полученные результаты

представлены в работе [43] и на сайте <http://geosiberia-2011.ssga.ru>. Результаты российской батиметрической съемки СЛО в 2010 г. были опубликованы за рубежом [44].

В 2011 и 2014 гг. российские исследования СЛО для внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) были связаны с выполнением сейсмических работ и проведением одновременной батиметрической съемки. Всего в 2010, 2011 и 2014 гг. было выполнено более 35 000 лин. км многолучевой батиметрической съемки.

В августе 2015 г. Российской Федерацией было представлено в Комиссию частично пересмотренное представление на расширенный континентальный шельф в СЛО [45].

Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана версии 3

Все американские и датские батиметрические материалы, полученные в период 2007 – 2011 гг., были переданы в редколлегию ИВСаО. Новая версия ИВСаО 3.0, появившаяся в 2013 г. [46], [47], является более совершенной по сравнению с версией 2008 г. В ней используются новые данные, собранные приарктическими государствами, включая данные исследовательских судов различных государств. При этом использование улучшенного алгоритма построения регулярной сетки позволило создать ЦМР с размером регулярной сетки 500 м. Источники данных ИВСаО версии 3 представлены в работе [46]. В то время как основная регулярная сетка глубин все ещё собрана с шагом 2×2 км, данные с более высоким разрешением (прежде всего многолучевые) с шагом 500×500 м были слиты с основной сеткой с применением метода «remove-restore». Этот подход в итоге даёт сетку с шагом 500×500 м, что позволяет намного лучше сохранить детали в тех областях, где исходные данные более плотные, чем в предыдущих версиях ИВСаО. В версии ИВСаО 3.0 процент покрытия данными от съёмки с МЛЭ увеличился (в версии ИВСаО 2.0) с 6 % до 11 %. Гиды ИВСаО версий 2.0 и 3.0 размещены на сайте <http://ibcao.org/> и в источнике [47]. Российские батиметрические данные 2010 – 2014 гг. официально не были представлены для использования в модели ИВСаО версий 3.0. Однако полученные ЦМР дна хорошо совмещаются с гидом ИВСаО версии 3.

В 2012 г. батиметрическая съемка в американской зоне СЛО была продолжена в односудовом варианте. При этом длина галсов составила более 10030 пог. км, а площадь покрытая многолучевой съемкой — 68600 м². Таким образом, общее время батиметрической съемки составило 275 дней, длина галсов — 57248 км, а покрытие было доведено почти до 388 000 км² [64]. Данные, полученные в 2012 г. не включены в третью версию модели ИВСаО.

В 2013 – 2014 гг. исследовательский ледокол «Healy» выполнял только океанографические работы в прибрежных районах Аляски (море Бофорта и Берингово море), но в 2015 – 2016 гг. его работы по обоснованию ВГКШ в СЛО были продолжены. Часть батиметрических материалов 2015 г. Недавно были выложены в Интернет. В период с 18 по 28 сентября 2016 г. была выполнена дополнительная многолучевая съемка на площади 14 000 км² в Чукотском море и море Бофорта.

Источники новых качественных батиметрических данных по Северному Ледовитому океану

Наиболее полные сведения по батиметрической съемке, выполненной в Арктике в интересах ВГКШ. Эти сведения предоставляет Объединенный гидрографический центр Университета Нью-Хемпшира (США). На интернет-сайте центра [48] помещены отчеты по рейсам ледокола береговой охраны США «Healy», а также гиды батиметрической съемки в трех различных ГИС-форматах. В результате этих работ в Объединенном гидрографическом центре Университета в Нью-Хемпшире подготовлена батиметрическая база данных, позволившая создать цифровую модель рельефа дна американского сектора в виде регулярной сетки с размерностью ячейки 40×40 м. Эта ЦМР получила название «USAMBC» v.1.0 и доступна на сайте Университета Нью-Хемпшира — рис. 4 [48]. Как видно из этой карты, в американской зоне СЛО в отдельных районах имеется практически сплошное покрытие. К таким районам относятся: континентальный склон

Аляски и прилегающая часть Канадской котловины; абиссальная часть равнины Менделеева, расположенная непосредственно к северу от Чукотского плато; южная часть уступа Нордвинд; уступ Нордвинд и прилегающая часть Канадской котловины; южная часть хребта Альфа (район гор Рябова). Указанные районы являются наиболее изученными в СЛО.

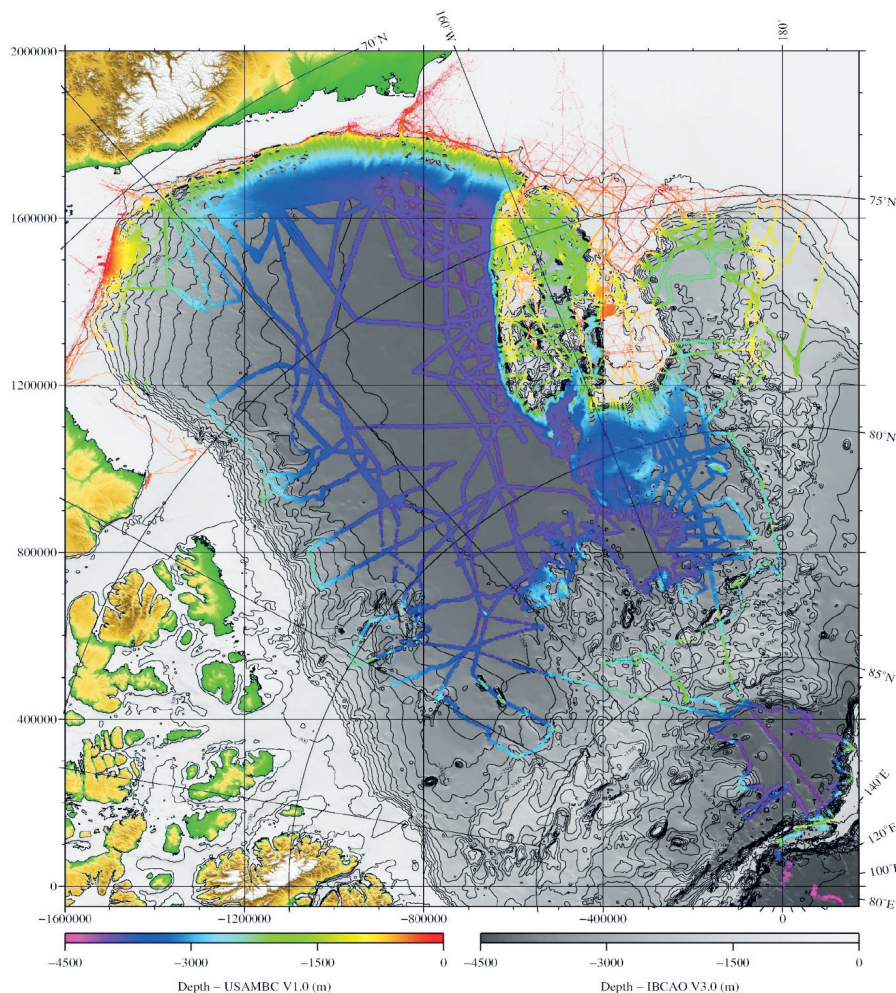


Рис. 4. Карта-схема рейсов американского ледокола «Healy» в период 2003 – 2012 гг.

Батиметрия по программе научных исследований «SCICEX» (1993 – 1999 гг. и 2001 – 2014 гг.). По данным зарубежных источников, точность позиционирования АПЛ в период рейсов по программе научных исследований «SCICEX» выполнялась с использованием штатного навигационного комплекса, системы курсоуказания и инерциальной навигационной системы. Точность позиционирования переменная и изменяется в пределах 200 – 2000 м (68 %) [18]. Точность определения глубины не хуже 1 %. Результаты батиметрической съемки по программе «SCICEX» с позиций требований Научно-технического руководства комиссии [38] не полностью соответствуют требованиям точности, заданным в Стандарте S-44 (редакции 4 и 5) МГО, по критерию допустимой точности положения глубин на дне [39]. Отметим, что в Представлении Королевства Дания на ВГКШ к северу от Гренландии [49] были использованы также результаты батиметрической съемки по программе «SCICEX». В частности, отдельные галсы были использованы для построения и анализа батиметрических профилей с целью определения подножия континентального склона (ПКС) на западном и восточном склоне хребта Ломоносова в российском секторе Арктики.

Батиметрические данные по программе научных исследований «SCICEX» (1993 – 1999 гг.) были включены в первую редакцию IBCAO v.1 (2001 г.) и уточнялись при подготовке второй редакции (2008 г.). Затем они были частично заменены новой современной информацией при издании

третьей версии IBCAO (2013 г.). Программа научных исследований «SCICEX» была продолжена в 2001 – 2014 гг. [50]. Однако полученная в Канадской котловине батиметрическая информация мало пригодна для решения задач обоснования ВГКШ.

В связи с появлением новых батиметрических данных, выполненных американским и канадским ледоколами «Healy» и «Louis S. St-Laurent» в Канадской котловине, Чукотском плато и поднятии Нордвинд, ценность батиметрии АПЛ по программе «SCICEX» в этих районах практически утратила свое значение. Батиметрические данные по этой программе доступны на сайтах NOAA и SCICEX в текстовом формате [50].

Новые батиметрические съемки, выполненные канадскими учеными в 2014 – 2016 гг.

Следует отметить, что представляют интерес сведения о батиметрической съемке, недавно выполненной канадскими учеными для обоснования своего расширенного континентального шельфа в СЛО. До 2012 г. Канада выполняла главным образом сейсмическую съемку в Канадской котловине, используя ледокол береговой охраны CCGS «Louis S. St-Laurent» в двухсудовом варианте с американским ледоколом «Healy». В 2012 г. США завершили свою программу работ в Центральном Арктическом бассейне. В декабре 2013 г. в Канаде было подготовлено и передано правительству представление на расширенный континентальный шельф в Арктике. Однако, по сообщениям канадской печати, премьер-министр Канады вернул представление на доработку, поставив ученым задачу включить в расширенный континентальный шельф Канады Северный полюс. Для решения этой задачи было решено выполнить дополнительные обширные батиметрические съемки и в 2014 г. Правительство Канады выделило 6,5 млн долл. для переоборудования ледокола «Louis S. St-Laurent» с целью установки на нем МЛЭ.

В 2014 – 2016 гг. были выполнены три батиметрических рейса в центральную часть СЛО в районы хребта Ломоносова, котловины Амундсена и Макарова, поднятий Менделеева-Альфа, а также примыкающих к ним частей Канадской котловины. В 2014 – 2015 гг. работы выполнялись в двухсудовом варианте с канадским ледоколом «Terry Fox», при этом было выполнено в общей сложности 19 550 лин. км многолучевой съемки. В 2016 г. состоялся последний 47-суточный рейс в двухсудовом варианте совместно со шведским ИЛ «Oden». При этом было выполнено 10 500 лин. км многолучевой съемки рельефа дна. Информация является конфиденциальной, она недоступна для использования, поскольку будет являться частью Представления по обоснованию ВГКШ в СЛО, которое Канада собирается представить в Комиссию ООН в 2018 г. Правительство Канады возлагает большие надежды на результаты многолучевой съемки, полагая при этом, что обширная батиметрическая информация в приполюсном районе СЛО даст основание Канаде претендовать на включение этого района в свой расширенный континентальный шельф.

По сравнению с батиметрическими данными, которыми располагают США и Канада для обоснования своего расширенного континентального шельфа в СЛО, Россия имеет несколько меньшую базу данных съемок с МЛЭ. Однако эта база данных является достаточной для обоснования формульных и ограничительных линий частично пересмотренного представления [45] в соответствии с требованиями Комиссии [38]. Тем не менее в целях геоморфологического анализа рельефа требуется уточненная база батиметрических данных по всей российской зоне СЛО. Кроме того, Россия располагает ретроспективной цифровой батиметрической базой данных, использованной при подготовке издания карты «Центральный Арктический Бассейн» (адмиралтейский номер 91115) [12], которая может быть актуализирована на основе сравнения с новыми «реперными» данными ЦМР по полосам обзора МЛЭ, а также дополнена современными отечественными и зарубежными данными.

В настоящее время выполняются анализ и подготовка новой Российской цифровой батиметрической базы данных и подготовка карты «Центральный Арктический бассейн» (адм. номер 91115) в цифровом виде. Вместе с тем необходимо проведение дополнительных батиметрических работ в СЛО. В первую очередь важно выполнить систематическое изучение рельефа дна с ис-

пользованием МЛЭ в зонах сопряжения провинции хребтов и поднятий Амеразийского бассейна с Евразией для подкрепления доказательств естественного продолжения континентальной окраины на хребет Ломоносова и поднятие Менделеева. Цифровая батиметрическая модель СЛО на основе ЦМР должна быть использована также для создания нового поколения электронных навигационных карт, которые необходимы не только для надводного мореплавания, но и для решения специальных задач в Арктике.

Выводы

1. Начало XXI в. является качественно новым этапом исследований СЛО, обусловленным возможностью применения многолучевых эхолотов и информационных технологий.

2. Задачи по определению внешней границы континентального шельфа арктических государств, в соответствии с требованиями Конвенцией по морскому праву, явились мощным стимулом развития съемок рельефа дна в Центральном Арктическом бассейне. Использование новых гидрографических и информационных технологий позволяют с высокой достоверностью и точностью использовать результаты современных батиметрических съемок для обоснования расширенного континентального шельфа в Арктике.

3. Мировое научное сообщество, создавшее первую версию цифровой батиметрической карты СЛО (IBCAO v.1) в 2001 г., постоянно улучшает ее на основе новых современных съемок с многолучевыми эхолотами.

4. Новые батиметрические съемки в Центральном Арктическом бассейне, выполненные в 2000 – 2014 гг., пока не выявили новых неизвестных ранее крупных форм рельефа дна в СЛО.

5. Выполненная в России батиметрическая съемка в интересах обоснования расширенного континентального шельфа в Арктике обеспечивает надежное формирование формульной линии Хедберга и ограничительной линии изобата 2500 м + 100 морских миль. На основе выполненных съемок рельефа дна подготовлено и представлено в Комиссию ООН по границам континентального шельфа частично пересмотренное представление Российской Федерации.

6. В связи с работами, выполненными учеными США и Канады в период 2003 – 2016 г., рельеф Амеразийского бассейна к настоящему времени в Центральном Арктическом бассейне можно считать наиболее изученным. Батиметрические материалы США, полученные в Амеразийском бассейне, находятся в свободном доступе в сети Интернет.

7. России следует продолжить выполнение детальных батиметрических съемок в Евразийском и Амеразийском бассейнах и в первую очередь в зонах сопряжения провинции хребтов и поднятий Амеразийского бассейна с Евразией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаккель Я. Я. Морфоструктура и донные осадки Арктического бассейна / Я. Я. Гаккель, Н. А. Белов, В. Д. Дибнер, Н. Н. Лапина // Труды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. — 1968. — Т. 285. — С. 15–27.

2. Киселев Ю. Г. Структура дна и эволюция геологического строения глубоководной части Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Киселев // Геофизические методы исследования Мирового океана. — Л.: НИИ геологии Арктики, 1979. — С. 5–13.

3. Ostenso N. A. Geophysical investigations of the Arctic Ocean basin / N. A. Ostenso. — Univ. Wisc. Geophys. and Polar Research Center, Research Report, 1962. — № 4. — 124 p.

4. Weber J. R. CESAR 83: Alpha Ridge probe will increase understanding of Arctic / J. R. Weber. — Resource Development, Winter 1982/83. — Pp. 10–12.

5. Weber J. R. Reinterpretation of morphology and crustal structure in the Central Arctic Ocean Basin / J. R. Weber, J. F. Sweeney // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 1985. — Vol. 90. — Is. B1. — C. 663–677. DOI: 10.1029/JB090iB01p00663.

6. Heezen B. C. Arctic Ocean Floor / B. C. Heezen // Supplement to National Geographic magazine. — 1971. — Vol. 140. — No. 4.

7. Heezen B. C. Map of the Arctic Region / B. C. Heezen, M. Tharp, M. Pinther. — 1975. — World 1:5 000 000.
8. Sweeney J. F. Continental ridges in the Arctic Ocean: LOREX constraints / J. F. Sweeney, J. R. Weber, S. M. Blasco // *Tectonophysics*. — 1982. — Vol. 89. — Is. 1–3. — С. 217–237. DOI:10.1016/0040-1951(82)90039-7.
9. Фридман Б. С. Результаты гидрографических исследований и картографирование рельефа дна Арктического бассейна для определения внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Б. С. Фридман. — СПб.: Наука, 2007. — 208 с.
10. Основы изображения подводного рельефа на морских картах. — Л.: Изд-во ГУНиО МО, 1973. — 162 с.
11. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. Масштаб 1:5 000 000, проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО, ВНИИОкеангеология, РАН, 1998.
12. Центральный Арктический бассейн. Масштаб 1:2 500 000, по параллели 75°. Проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — № 91115.
13. Алексеев А. С. Обновленная карта Северного Ледовитого океана / А. С. Алексеев, А. Ф. Зеньков, А. М. Шарков, В. И. Коваленок // *Российские полярные исследования*. — 2013. — № 1 (11). — С. 44–46.
14. GEBCO Undersea Features Names Gazetteer. Arctic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/> (дата обращения — 02.11.2016).
15. Baker E. T. Hydrothermal venting in magma deserts: The ultraslow spreading Gakkel and Southwest Indian Ridges / E. T. Baker, H. N. Edmonds, P. J. Michael, W. Bach, H. J. B. Dick, J. E. Snow, S. L. Walker, N. R. Banerjee, C. H. Langmuir // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2004. — Vol. 5. — Is. 8. DOI:10.1029/2004GC000712.
16. Jakobsson M. New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers / M. Jakobsson, N. Cherkis, J. Woodward, R. Macnab, B. Coakley // *EOS, Transactions American Geophysical Union*. — 2000. — Vol. 81. — Is. 9. — Pp. 89–96. DOI: 10.1029/00EO00059.
17. Jakobsson M. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). Beta Version. Technical Reference and User's Guide / M. Jakobsson, R. Macnab, Members of the Editorial Board. — 2001. — 14 p.
18. Edwards M. H. SCICEX investigations of the Arctic Ocean system / M. H. Edwards, B. J. Coakley // *Chemie der Erde-Geochemistry*. — 2003. — Vol. 63. — Is. 4. — Pp. 281–328. DOI:10.1078/0009-2819-00039.
19. Björk G. Bathymetry and deep-water exchange across the central Lomonosov Ridge at 88–89°N / G. Björk, M. Jakobsson, B. Rudels, J. H. Swift, L. Anderson, D. A. Darby, J. Backman, B. Coakley, P. Winsor, L. Polyak, M. Edwards // *Deep-Sea Research. Part I*. — 2007. — Is. 54. — Pp. 1197–1208. DOI: 10.1016/j.dsr.2007.05.010.
20. Jakobsson M. Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor / M. Jakobsson, A. Grantz, Y. Kristoffersen, R. Macnab // *Geological Society of America Bulletin*. — 2003. — V. 115. — No. 12. — Pp. 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1.
21. U.S. Extended Continental Shelf Project [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Режим доступа: <http://continentalshelf.gov/> (дата обращения — 05.10.2016).
22. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin, Barrow to Barrow. Cruise Report / L. A. Mayer. — University of New Hampshire (UNH), 2003. — 19 p.
23. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2004 / L. A. Mayer. — University of New Hampshire (UNH), 2004. — 47 p.
24. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2007 / L. A. Mayer, A. A. Armstrong. — University of New Hampshire (UNH), 2007. — 182 p.
25. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2008 / L. A. Mayer, A. A. Armstrong. — University of New Hampshire (UNH), 2008. — 179 p.
26. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea cruise to map the foot of the slope and 2500-m isobath of the US Arctic Ocean margin, cruise report for 2009 / L. A. Mayer, A. A. Armstrong. — Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM)/Joint Hydrographic Center (JHC), 2009. — 118 p.
27. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin / L. A. Mayer, A. A. Armstrong. — Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM)/Joint Hydrographic Center (JHC), 2011. — 235 p.
28. Canada's Extended Continental Shelf [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.international.gc.ca/arctic-arctique/continental/index.aspx?lang=eng&_ga=1.14551287.1900142442.1477068766 (дата обращения — 05.10.2016).

29. Mosher D. C. Canadian UNCLOS Extended Continental Shelf Program seismic data holdings (2006–2011) // D. C. Mosher, J. W. Shimeld, D. R. Hutchinson, H. R. Jackson // Geological Survey of Canada. — Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada, 2016. — 8 p. DOI: 10.4095/297590.
30. The Continental Shelf Project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://a76.dk/lng_uk/main.html (дата обращения — 05.10.2016).
31. Jakobsson M. Lomonosov Ridge off Greenland 2007 (LOMROG), Cruise Report / M. Jakobsson, C. Marcussen, LOMROG Scientific Party. — 2007. — 124 p.
32. Marcussen C. Lomonosov Ridge off Greenland 2009 (LOMROG II) – Cruise Report / C. Marcussen, the LOMROG II Scientific Party. — Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate and energy, 2009. — 154 p.
33. Marcussen C. Lomonosov Ridge off Greenland 2012 (LOMROG III) – Cruise Report / C. Marcussen, the LOMROG III Scientific Party. — Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate, energy and building, 2012. — 220 p.
34. Фирсов Ю. Г. Анализ зарубежного опыта и перспективы российских исследований Северного Ледовитого океана в интересах определения внешней границы континентального шельфа / Ю. Г. Фирсов, В. Н. Баландин, И. В. Меньшиков // Геодезия и картография. — 2010. — № 9. — С. 54–59.
35. Mayer L. A. U.S. Law of the Sea cruise to map and sample the US Arctic Ocean margin / L. A. Mayer, A. Armstrong. — Center for Coastal and Ocean Mapping, 2012. — 159 p.
36. Jakobsson M. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses / M. Jakobsson, R. McNab, L. Mayer, R. Anderson, M. Edwards, J. Hatzky, H-W. Schenke, P. Johnson // Geophysical Research Letters. — 2008. — Vol. 35. — Is. 7. DOI: 10.1029/2008GL033520.
37. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ibcao.org/> (дата обращения — 10.10.2016).
38. Научно-техническое Руководство Комиссии по границам континентального шельфа. Пятая сессия. — Нью-Йорк, 3 – 14 мая 1999 г. — 90 с.
39. IHO Standards for Hydrographic Survey. — 5th Edition. — Special Publication № 44. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. — 28 p.
40. Фирсов Ю. Г. Анализ технологий для обеспечения батиметрических исследований Северного Ледовитого океана в интересах определения внешней границы континентального шельфа и опыт их применения / Ю. Г. Фирсов, В. Н. Баландин, И. В. Меньшиков, Н. Г. Мустафин // Геодезия и картография. — 2010. — № 5. — С. 49–55.
41. Фирсов Ю. Г. Анализ методики проектирования и выполнения батиметрической съемки Северного Ледовитого океана с использованием современных технологий / Ю. Г. Фирсов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 2. — С. 50–54.
42. Фирсов Ю. Г. Методика и контроль качества батиметрической съемки в высокоширотных зонах Арктики, значимых для определения внешней границы континентального шельфа России / Ю. Г. Фирсов, В. Д. Каминский, В. А. Поселов // VII Российская науч.-техн. конф. «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» (НГО-2011): тр. конф. — СПб.: ГНИНГИ, 2011. — С. 325–330.
43. Фирсов Ю. Г. Цифровые модели рельефа дна и анализ батиметрических профилей для формирования внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Сборник материалов VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». — Новосибирск: СГГА, 2011. — С. 153–162.
44. Glumov I. F. Challenge in the Arctic / I. Glumov, A. Zenkov, D. Zhilin // Hydro International. — 2012. — January / February.
45. Частичное пересмотренное представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Резюме. — 2015. — 37 с.
46. Jakobsson M. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 / M. Jakobsson, L. Mayer, B. Coakley, J. A. Dowdeswell, S. Forbes, B. Fridman, H. Hodnesdal, R. Noormets, R. Pedersen, M. Rebesco, H. W. Schenke, Y. Zarayskaya, D. Accettella, A. Armstrong, R. M. Anderson, P. Bienhoff, A. Camerlenghi, I. Church, M. Edwards, J. V. Gardner, J. K. Hall, B. Hell, O. Hestvik, Y. Kristoffersen, C. Marcussen, R. Mohammad, D. Mosher, S. V. Nghiem, M. T. Pedrosa, P. G. Travaglini, P. Weatherall // Geophysical Research Letters. — 2012. — Vol. 39. — Is. 12. DOI: 10.1029/2012GL052219.

47. IBCAO Version 3.0 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/ibcaoversion3.html> (дата обращения — 15.10.2016).

48. Center for Coastal and Ocean Mapping. Joint Hydrographic Center). United States Arctic Multibeam Compilation (v1.0) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ccom.unh.edu/data/united-states-arctic-multibeam-compilation-v10> (дата обращения — 15.10.2016).

49. Partial Submission of the Government of the Kingdom of Denmark together with the Government of Greenland to the Commission on the Limits of the Continental Shelf. Th Northern Continental Shelf of Greenland. Executive Summary. — Denmark: Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), 2014. — 52 p.

50. SCICEX Submarine Arctic program [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nsidc.org/scicex/history.html#bathy> (дата обращения — 15.10.2016).

MODERN BATHYMETRIC SURVEY IN THE ARCTIC OCEAN IN THE CONTEXT OF THE EXTENDED CONTINENTAL SHELF DETERMINATION IN ARCTIC

The study examines a recent effort of the Arctic countries during the last 10-15 years into conducting the bathymetric survey in the Arctic Ocean using modern hydrographic technologies. The bottom relief of the central Arctic Basin became very important as a result of the Arctic countries race for the determination of their extended continental shelf boundaries. The precise bathymetric survey is important for the determination of the foot of continental slope position which is the basis for constructing the formula lines according to Article 76 UNCLOS. One of the constraint lines associated with the location of 2500 m isobaths also requires a detailed survey with the aid of new hydrographic technologies.

The study provides a short historical overview of the Arctic Ocean relief investigations. It highlights the Russian priority which is reflected by the bottom relief toponyms named after Russian explorers as well as compiled modern bathymetric charts.

The study also reviews bathymetric activities of Denmark, Canada, USA and Russia during the period of 2000 - 2016 which used the modern hydrographic equipment such as multi beam echo sounders, precise GNSS-positioning and GIS technologies. It is emphasised that these bathymetric surveys were especially aimed at solving the problem of the extended continental shelf determination of the Arctic countries.

The review of the International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) version is also presented along with the data used as the basis for its creation. The publicly available bathymetric data in the form of digital terrain models and spot soundings are presented.

In conclusion it is suggested that the Amerasian Basin has currently the most explored bottom relief in the Arctic Ocean.

The main results of undertaken bathymetric investigations and the seafloor quality achieved from deep water multi beam survey are provided.

Keywords: *limits of the Continental Shelf, Article 76 United Nations Convention on the Law of the Sea, IBCAO, foot of slope, swath bathymetric survey, digital terrain models, bathymetric survey quality.*

REFERENCES

1. Gakkel, Ya. Ya, N. A. Belov, V. D. Dibner, and N. N. Lapin. "Morfostruktura i Donnie osadki Arcticheskogo Basseina." *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* 285 (1968): 15–27.
2. Kiselev, Ju. G. "Struktura dna i jevoljucija geologicheskogo stroenija glubokovodnoj chasti Severnogo Ledovitogo okeana." *Geofizicheskie metody issledovaniya Mirovogo okeana*. L.: NII geologii Arktiki, 1979: 5–13.
3. Ostenso, N. A. *Geophysical investigations of the Arctic Ocean basin*. Univ. Wisc. Geophys. and Polar Research Center, Research Report, 1962. № 4.
4. Weber, J. R. *CESAR 83: Alpha Ridge probe will increase understanding of Arctic*. Resource Development, Winter 1982/83, pp. 10–12.
5. Weber, J. R., and J. F. Sweeney. "Reinterpretation of morphology and crustal structure in the Central Arctic Ocean Basin." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 90.B1 (1985): 663–677. DOI: 10.1029/JB090iB01p00663.
6. Heezen, B. C. "Arctic Ocean Floor." *Supplement to National Geographic magazine* 140.4 (1971).
7. Heezen, B. C., M. Tharp, and M. Pinther. *Map of the Arctic Region*. 1975. World 1:5,000,000.

8. Sweeney, J. F., J. R. Weber, and S. M. Blasco. "Continental ridges in the Arctic Ocean: LOREX constraints." *Tectonophysics* 89. 1–3 (1982): 217–237. DOI:10.1016/0040-1951(82)90039-7.
9. Fridman, B. S. *Rezultaty gidrograficheskikh issledovanij i kartografirovaniye relefa dna Arkticheskogo bassejna dlja opredelenija vneshnej granicy kontinentalnogo shelfa Rossii v Arktike*. SPb.: Nauka, 2007.
10. *Osnovy izobrazheniya podvodnogo relefa na morskikh kartah*. L.: Izd. GUNiO MO, 1973.
11. *Relief dna Severnogo Ledovitogo okeana. Masshtab 1:5 000 000, proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO, VNIIOkeangeologija, RAN, 1998.
12. *Centralnyj Arkticheskij bassejn. Masshtab 1:2 500 000, po paralleli 75°. Proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002. № 91115.
13. Alekseev, A. S., A. F. Zenkov, A. M. Sharkov, and V. I. Kovalenok. "Obnovlennaja karta Severnogo Ledovitogo okeana." *Rossijskie poljarnye issledovanija* 1(11) (2013): 44–46.
14. GEBCO Undersea Features Names Gazetteer. Arctic. Web. 2 Nov. 2016 <<http://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/>>.
15. Baker, Edward T., Henrietta N. Edmonds, Peter J. Michael, Wolfgang Bach, Henry J. B. Dick, Jonathan E. Snow, Sharon L. Walker, Neil R. Banerjee, and Charles H. Langmuir. "Hydrothermal venting in magma deserts: The ultraslow spreading Gakkel and Southwest Indian Ridges." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5.8 (2004). DOI:10.1029/2004GC000712.
16. Jakobsson, Martin, Norman Cherkis, John Woodward, Ron Macnab, and Bernard Coakley. "New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers." *EOS, Transactions American Geophysical Union* 81.9 (2000): 89–96. DOI: 10.1029/00EO00059.
17. Jakobsson, M., R. Macnab, and Members of the Editorial Board. *International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). Beta Version. Technical Reference and User's Guide*. 2001.
18. Edwards, Margo H., and Bernard J. Coakley. "SCICEX investigations of the Arctic Ocean System." *Chemie der Erde-Geochemistry* 63.4 (2003): 281–328. DOI:10.1078/0009-2819-00039.
19. Björk, Göran, Martin Jakobsson, Bert Rudels, James H. Swift, Leif Anderson, Dennis A. Darby, Jan Backman, Bernard Coakley, Peter Winsor, Leonid Polyak, and Margo Edwards. "Bathymetry and deep-water exchange across the central Lomonosov Ridge at 88–89°N." *Deep-Sea Research. Part I* 54 (2007): 1197–1208. DOI: 10.1016/j.dsr.2007.05.010.
20. Jakobsson, M., A. Grantz, Y. Kristoffersen, and R. Macnab. "Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor." *Geological Society of America Bulletin* 115.12 (2003): 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1.
21. U. S. Extended Continental Shelf Project. Web. 5 Oct. 2016 <<http://continentalshelf.gov/>>.
22. Mayer, L. A. *U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin, Barrow to Barrow. Cruise Report*. University of New Hampshire (UNH), 2003.
23. Mayer, L. A. *U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2004*. University of New Hampshire (UNH), 2004.
24. Mayer, L. A., and A. A. Armstrong. *U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2007*. University of New Hampshire (UNH), 2007.
25. Mayer, L. A., and A. A. Armstrong. *U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin. Cruise Report for 2008*. University of New Hampshire (UNH), 2008.
26. Mayer, L. A., and A. A. Armstrong. *U.S. Law of the Sea cruise to map the foot of the slope and 2500-m isobath of the US Arctic Ocean margin, cruise report for 2009*. Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM)/Joint Hydrographic Center (JHC), 2009.
27. Mayer, L. A., and A. A. Armstrong. *U.S. Law of the Sea Cruise to Map the Foot of the Slope and 2500-m Isobath of the U.S. Arctic Ocean Margin*. Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM)/Joint Hydrographic Center (JHC), 2011.
28. Canada's Extended Continental Shelf. Web. 5 Oct. 2016 <http://www.international.gc.ca/arctic-arctique/continental/index.aspx?lang=eng&_ga=1.14551287.1900142442.1477068766>.
29. Mosher, D. C., J. W. Shimeld, D. R. Hutchinson, and H. R. Jackson. "Canadian UNCLOS Extended Continental Shelf Program seismic data holdings (2006–2011)." *Geological Survey of Canada*. Natural Resources Canada / Ressources naturelles Canada, 2016. 8 p. DOI:10.4095/297590.
30. The Continental Shelf Project. Web. 5 Oct. 2016 <http://a76.dk/lng_uk/main.html>.
31. Jakobsson, Martin, Christian Marcussen, and LOMROG Scientific Party. *Lomonosov Ridge off Greenland 2007 (LOMROG), Cruise Report*. 2007.
32. Marcussen, Christian, and the LOMROG II Scientific Party. *Lomonosov Ridge off Greenland 2009 (LOMROG II) – Cruise Report*. Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate and energy, 2009.

33. Marcussen, Christian, and the LOMROG III Scientific Party. *Lomonosov Ridge off Greenland 2012 (LOMROG III) — Cruise Report*. — Geological survey of Denmark and Greenland, Ministry of climate and energy, 2012.
34. Firsov, Yu. G., V. N. Balandin, and I. V. Menshikov. "Analysis of foreign experience and prospects for Russian studies of the Arctic Ocean aimed at identifying outer limits of continental shelf." *Geodesy and Cartography* 9 (2010): 54–59.
35. Mayer, Larry A., and Andy Armstrong. *U.S. Law of the Sea cruise to map and sample the US Arctic Ocean margin*. Center for Coastal and Ocean Mapping, 2012.
36. Jakobsson, Martin, Ron Macnab, Larry Mayer, Robert Anderson, Margo Edwards, Jörn Hatzky, Hans Werner Schenke, and Paul Johnson. "An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses." *Geophysical Research Letters* 35.7 (2008). DOI: 10.1029/2008GL033520, 2008.
37. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean. Web. 10 Oct. 2016 <<http://ibcao.org/>>.
38. *Nauchno-tehnicheskoe Rukovodstvo Komissii po granicam kontinentalnogo shelfa*. Pjataja sessija. Nju-Jork, 3-14 maja 1999 g.
39. *IHO Standards for Hydrographic Survey*. 5th Edition. Special Publication № 44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
40. Firsov, Yu. G., V. N. Balandyn, I. V. Menshikov, and M. G. Mustafin. "Analiz tekhnologiy dlya obespecheniya batimetricheskikh issledovaniy Severnogo Ledovitogo okeana v interesakh opredeleniya vneshney granitsy kontinentalnogo shel'fa i opyt ikh primeneniya." *Geodesy and Cartography* 5 (2010): 49–55.
41. Firsov, Y. G. "Analysis of the methods of modeling and conducting the bathymetric survey in the Arctic ocean with usage of modern technologies." *Jekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2010): 50–54.
42. Firsov, Yu. G., V. D. Kaminsky, and V. A. Poselov. "Metodika i control kachestva batimetricheskoi siomki v vysokoshirotnykh zonakh Arktiki, znachimykh dlya opredeleniya vneshney granitsy kontinentalnogo shel'fa Rossii." *Trudi VII Rossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Navigatsiya, gidrografiya i okeanografiya: priority razvitiya i innovatsii morskoy deyatel'nosti"*. SPb: GNINGI, 2011: 325–330.
43. Firsov, Yu. G. "Digital models of the ocean bottom relief and analysis of bathymetric profiles for Russian outer continental shelf boundary formation in Arctics." *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa «GEO-Sibir'-2011»*. Novosibirsk: SGGA, 2011: 153–162.
44. Glumov, I. F., A. Zenkov, and D. Zhilin. "Challenge in the Arctic." *Hydro International* January/February (2012).
45. *Chastichnoe peresmotrennoe predstavlenie Rossijskoj Federacii v Komissiju po granicam kontinentalnogo shelfa v otnoshenii kontinentalnogo shelfa v Severnom Ledovitom okeane. Rezjume*. 2015.
46. Jakobsson, M., L. Mayer, B. Coakley, J. A. Dowdeswell, S. Forbes, B. Fridman, H. Hodnesdal, R. Noormets, R. Pedersen, M. Rebecso, H. W. Schenke, Y. Zarayskaya, D. Accettella, A. Armstrong, R. M. Anderson, P. Bienhoff, A. Camerlenghi, I. Church, M. Edwards, J. V. Gardner, J. K. Hall, B. Hell, O. Hestvik, Y. Kristoffersen, C. Marcussen, R. Mohammad, D. Mosher, S. V. Nghiem, M. T. Pedrosa, P. G. Travaglini, and P. Weatherall. "The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0." *Geophysical Research Letters* 39.12 (2012). DOI: 10.1029/2012GL052219
47. IBCAO Version 3.0. Web. 15 Oct. 2016 <<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/ibcaoversion3.html>>.
48. Center for Coastal and Ocean Mapping. Joint Hydrographic Center. United States Arctic Multibeam Compilation (v1.0). Web. 15 Oct. 2016 <<http://ccom.unh.edu/data/united-states-arctic-multibeam-compilation-v10>>.
49. *Partial Submission of the Government of the Kingdom of Denmark together with the Government of Greenland to the Commission on the Limits of the Continental Shelf. Th Northern Continental Shelf of Greenland. Executive Summary*. Denmark: Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), 2014.
50. SCICEX Submarine Arctic program. Web. 15 Oct. 2016 <<https://nsidc.org/scicex/history.html#bathy>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov Yuriy Georgievich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University for Maritime
and Inland Shipping
gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2016 г

СПОСОБЫ СБОРА ДАННЫХ ОБРАТНОГО РАССЕИВАНИЯ МОРСКОГО ДНА, РЕАЛИЗОВАННЫЕ В СОВРЕМЕННЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭХОЛОТАХ

Методы обработки многолучевой гидроакустической информации, реализованные в современных гидрографических системах, касаются главным образом батиметрии. Однако современный многолучевой эхолот позволяет также получать и данные обратного рассеивания. До настоящего времени не существует универсального стандартного подхода для обработки и интерпретации данных обратного рассеивания многолучевых эхолотов (МЛЭ). Фирмы-разработчики многолучевых эхолотов используют собственные методы первичной обработки данных обратного рассеивания и предлагают различные методы визуализации этих данных. Все данные обратного рассеивания, собранные с помощью систем МЛЭ, являются производными от интенсивности обратного рассеивания, или её квадратного корня, который является мгновенной амплитудой, обычно называемой огибающей обратного рассеивания (ОР). Для получения оценок коэффициента ОР морского дна и его угловой зависимости важно знать, интенсивность или амплитуда ОР были записаны эхолотом. В настоящий момент существует четыре возможных способа записи данных ОР, применяемых в современных гидроакустических многолучевых системах. Целью данной работы является устранение неопределенности в области сбора и обработки данных обратного рассеивания морского дна. В статье рассмотрены существующие методы записи данных обратного рассеивания, применяемые в современных высокочастотных многолучевых эхолотах, а также соответствующие методы обработки этих данных. Отмечается, что выбор метода записи данных ОР системой МЛЭ зависит от конкретной цели изучения или исследования морского дна. Для получения мозаик ОР морского дна из перекрывающихся данных МЛЭ необходимо принимать во внимание и компенсировать влияние угла падения на силу ОР. Дополнительно рассмотрены возможные ошибки, которые могут появиться при обработке данных обратного рассеивания. Такие ошибки проиллюстрированы данными, собранными с помощью МЛЭ типа «Reason SeaBat» и других современных многолучевых систем.

Ключевые слова: съемка рельефа дна, гидроакустика, эхо-сигнал, гидролокатор бокового обзора, многолучевые эхолоты, современные гидрографические технологии, Reson, Kongsberg, водная толща, обратное рассеивание, сниметы, морские геологоразведочные работы.

Введение

Многолучевой эхолот (МЛЭ) признан самым эффективным инструментом для картографирования морского дна. МЛЭ способны собирать батиметрические данные и данные обратного рассеивания (ОР) одновременно в широкой полосе обзора и с высоким разрешением. Это позволяет производить экономически эффективное картографирование морского дна, включая возможность дистанционной классификации различных типов морского дна.

Одним из первых исследователей, продемонстрировавших потенциал данных ОР, собранных с помощью МЛЭ в целях классификации донных осадков, был Де-Мустье [1]. Другие исследовательские работы [2] – [6] позволили развить методы обработки данных ОР. Эти методы были разработаны и апробированы, в первую очередь, для низкочастотных МЛЭ (менее 100 кГц) как наиболее распространенных в то время. Несмотря на то, что основные принципы измерения силы обратного рассеивания морского дна схожи при низких и высоких частотах, геометрия измерения и физические условия, такие как коэффициент и пятно засветки по отношению к шкале шероховатости дна и параметру Рэлея, существенно различаются.

На протяжении последних 10 лет исследований были предложены специально разработанные методы анализа и обработки для высокочастотных систем с узкими лучами. Различные методы обработки батиметрических данных разработаны и реализованы в гидрографическом программном обеспечении, предоставляемом как самими производителями МЛЭ, так и другими компаниями. Однако до настоящего времени не существует универсального стандартного подхо-

С каждым принятым лучом эхолот «осматривает» определенный участок дна, ограниченный наложением проекций отправленного и принятого луча, так называемым *пятном засветки*. Единоновременно освещенный участок морского дна, отражающий эхо-сигнал эхолота обратно на приемную антенну, ограничен продолжительностью отправляемого импульса и имеет кольцеобразную форму с внешним и внутренним радиусами (r_1 и r_2 соответственно). Эти радиусы изменяются со временем t_r , истекшим с момента отправки, как показано в уравнениях:

$$r_1 = \left[\left(\frac{Ct_r}{2} \right)^2 - D^2 \right]^{1/2};$$

$$r_2 = \text{Re} \left[\left(\frac{Ct_r}{2} - \frac{CT}{2} \right)^2 - D^2 \right]^{1/2},$$

где D — высота антенн эхолота над поверхностью дна; C — скорость звука в воде; T — длина переданного импульса.

Область засветки представляет собой круг $t_r \leq 2D / C + T$, где $r_2 = 0$.

Методы записи данных обратного рассеивания. Все данные обратного рассеивания, собранные с помощью систем МЛЭ, являются производными от интенсивности обратного рассеивания, или её квадратного корня, который является мгновенной амплитудой, которую обычно называют *огibaющая ОР*. Для получения оценок коэффициента ОР морского дна и его угловой зависимости важно знать, интенсивность или амплитуда ОР были записаны эхолотом. В настоящий момент существует четыре возможных способа записи данных ОР, применяемых в МЛЭ «Reson» и в некоторых других современных МЛЭ системах (Kongsberg EM 122, 302, 712 и 2040 серий).

В порядке уменьшения объема регистрируемой информации существующие способы записи данных ОР можно представить в следующем виде:

- полный эхо-сигнал (или *огibaющая ОР*, или интенсивность) от каждого луча, в том числе сигналы ОР от толщи воды;
- фрагмент *огibaющей ОР* с центром, находящимся в районе места обнаружения дна для каждого луча (упоминается здесь как *огibaющая ОР морского дна*);
- два временных ряда амплитуд ОР, созданных путем объединения интенсивности или *огibaющей ОР* в отдельные лучи для левого и правого борта, наподобие данных классического гидролокатора бокового обзора (ГБО);
- одно значение ОР для луча в пределах каждого отражения от морского дна. Некоторые из современных систем «Reson» записывают пиковую амплитуду ОР морского дна, полученную для каждого луча, в то время как МЛЭ других производителей записывает другие производные ОР.

Далее выполнено описание различий между этими методами и анализируется выбор наиболее подходящего метода записи для конкретных задач.

Полный эхо-сигнал. Сбор данных полного эхо-сигнала может быть выполнен современными МЛЭ, например, системами «Reason 7125» и «Г20Р». В программном обеспечении системы «Reson» такие данные называются «snapshot» (снимок). Подобный метод записи каждого луча, включая амплитуду (рис. 2) и фазу, очень полезен для решения некоторых задач, относящихся к водной толще, таких как поиск рыбы для промысла, изучение внутренних волн, определение наименьших глубин над подводными объектами, а также изучение донного газопроявления (например, поиск выходов газогидратов [8] – [11]). На рис. 2 уровень обратного рассеивания показан в децибелах через уровень опорного сигнала в аналого-цифровом преобразователе МЛЭ, т. е. полное системное усиление МЛЭ не было применено. При картографировании морского дна на больших глубинах для обеспечения безопасности мореплавания в записи таких данных нет необходимости. Кроме того, при одновременной записи полного эхо-сигнала и батиметрии объем данных значительно возрастает, что может привести к задержкам и снизить общую скорость передачи данных в системе.

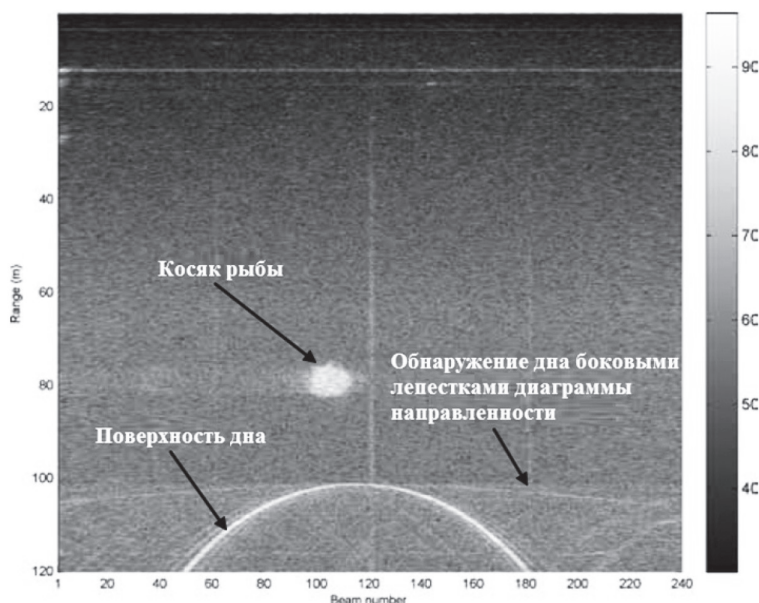


Рис. 2. Пример изображения полного эхо-сигнала, одной посылки МЛЭ системы «Reson 8125»

Так, например, система «Reson 8125» способна записывать полный эхо-сигнал только каждой пятой посылки. Последние достижения в области записи данных и увеличения компьютерных мощностей позволяют решить эту проблему в современных системах, таких как «Reason 7125».

Фрагмент пакета данных обратного рассеивания. Фрагменты пакета данных обратного рассеивания, которые компания «Reason» называет «снимками» (snippets) в своем фирменном программном обеспечении, являются фрагментами полного эхо-сигнала, которые выбраны так, чтобы содержать в себе эхо-сигнал морского дна в каждом луче (рис. 3). Начало образца каж-

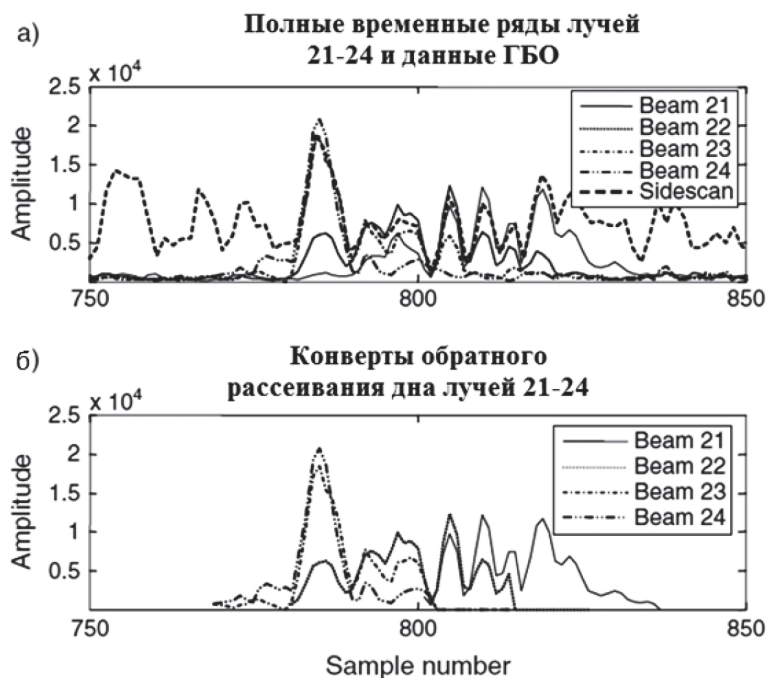


Рис. 3. Сравнение разных примеров обратного рассеивания, записанных МЛЭ:

- а — сто фрагментов полного эхо-сигнала и ГБО-подобный ряд, синтезированный из этих фрагментов;
- б — конверты обратного рассеивания полного эхо-сигнала

дого пакета данных ОР во всем эхо-сигнале («офсет фрагмента») и длина каждого фрагмента заданы процессором МЛЭ на основании диапазона определения дна и оценки диапазона наклонной дальности к внешним и внутренним границам пятна засветки на морском дне [12]. Эти вычисления обычно выполняются на основе модели плоского дна для каждой посылки МЛЭ. Иногда длина фрагментов, выбранных аппаратной частью МЛЭ, не настолько велика, чтобы содержать в себе весь отраженный эхо-сигнал от морского дна. Недостаточность длины фрагмента наблюдается чаще на крайних лучах и реже на внутренних, так как длина отраженного сигнала увеличивается по мере увеличения угла наклона [13].

Данные классического гидролокатора бокового обзора как опция ГБО многолучевого эхолота. Во время записи данных в режиме ГБО система МЛЭ комбинирует данные обратного рассеивания, принятые со смежных лучей, «сшивая» их вместе из двух (левого и правого бортов) и создавая похожие на данные ГБО временные ряды амплитуды ОР (рис. 3). Основной проблемой в объединении сигналов от различных лучей для формирования общего ГБО-подобного ряда является то, что данные соседних лучей, совпадающих по времени, обычно имеют различные амплитуды, так как пакеты обратного рассеивания искажены диаграммой направленности приемных лучей. Наиболее подходящий способ в данном случае заключается в точном исправлении диаграммы направленности для уравнивания перекрывающихся образцов.

Известно несколько полуэмпирических подходов к решению проблемы перекрывающихся образцов, состоящих из соседних лучей, для синтеза ГБО подобного ряда, которые реализованы в некоторых последних системах МЛЭ. Например, в системе «Reason 8125» оператор может заменить существующее значение либо его среднеквадратической погрешностью, либо средним значением. Не существует стандартного подхода к объединению перекрытия пакетов обратного рассеивания в разных лучах. Методы комбинирования лучей могут различаться от системы к системе и быть неизвестными для некоторых систем. Кроме того, ГБО-подобные ряды, синтезированные аппаратной частью МЛЭ, не связаны пространственно с батиметрическими данными, что делает проблематичным производство связанных батиметрических цифровых изображений и сонарных изображений силы ОР. В случае, если ГБО-ряды должны быть собраны одновременно с батиметрическими данными, полезно создавать их из пакетов обратного рассеивания, связанных на плоскости с батиметрическими данными по каждому лучу. В этом случае пользователь может выбрать наиболее подходящий алгоритм для объединения перекрывающихся эхо-сигналов от различных лучей.

Единичное значение обратного рассеивания луча. Для уменьшения объема записываемых данных в некоторых МЛЭ-системах использован режим регистрации данных, при котором одно значение обратного рассеивания применяется для каждого луча. Это может быть либо единичное значение интенсивности / огибающей образца, выбранное аппаратным обеспечением МЛЭ, либо какое-либо среднее значение, вычисленное процессором МЛЭ. Например, когда система «Reson 8125» установлена в режиме «RI-Theta» (дальность, интенсивность, угол луча), процессор эхолота находит максимальную амплитуду каждого «конверта» (envelope) данных обратного рассеивания морского дна и сохраняет его в отдельном массиве данных, именуемом «intensity» (интенсивность) ОР, несмотря на то, что это амплитуда, а не интенсивность. Однако использование максимума огибающей или интенсивности ОР приводит к систематическому и значительному завышению силы ОР, измеренной на внешних лучах, когда пятно засветки луча намного больше, чем площадь озвучивания [14]. Более разумный подход, который не приводит к заметным систематическим погрешностям силы ОР, заключается в записи образца конверта ОР, которая соответствует или приближена к центру луча, значение которого не обязательно является максимальным.

Отдельные образцы ОР, выбранные из различных лучей, имеют большие колебания из-за стохастической природы акустического рассеивания, что приводит к сильной зашумленности мозаик ОР дна. Расчет энергии ОР, т. е. интеграл от квадрата огибающей, полученной каждым лучом, значительно уменьшает результирующие колебания и, следовательно, шум мозаики ОР морского дна.

Выбор метода записи. Выбор метода записи данных ОР системой МЛЭ зависит от конкретной цели изучения или исследования морского дна. Запись полного эхо-сигнала сохраняет большую гибкость для последующей постобработки и позволяет получить данные ОР из водной толщи [10]. Тем не менее для изучения морского дна необходимо стараться сохранить как можно большую частоту посылок и, следовательно, получать более высокую детализацию съемки. Если для имеющейся системы МЛЭ запись полного эхо-сигнала невозможна из-за ограничений объема передачи данных, следует обратить внимание на пакеты данных ОР. Пакеты могут быть использованы для получения ГБО-подобных рядов и / или вычисления силы ОР по каждому

лучу. ГБО-подобные ряды могут быть полезны для визуализации морского дна, тогда как интенсивность и значения энергии ОР, полученные для каждого луча, являются более подходящими для измерения силы ОР морского дна и изучения её угловой зависимости. Даже если одного значения ОР для каждого луча достаточно для съемки, полезнее получить его из пакетов данных ОР, а не просто использовать в виде отдельного значения, так как это позволяет осуществлять максимальный контроль.

Обработка данных обратного рассеивания. Методы обработки сигналов, обратно рассеянных из водной толщи, описаны [15]. Если системой МЛЭ регистрируется полный эхо-сигнал и позже используется для обработки, то необходимо позиционировать «конверты» ОР с использованием батиметрических измерений и экстрагировать их для расчета характеристик ОР морского дна.

Перед обработкой данных ОР определяются x , y , z положения центра пятна засветки каждого луча, каждой посылки МЛЭ, которые обычно реализуются в программном обеспечении для обработки батиметрических данных. Существует два способа обработки данных ОР морского дна. Первый способ заключается в вычислении коэффициента ОР поверхности (сила ОР морского дна) для каждого луча, второй — в создании ГБО-подобных рядов для лучей правой и левой частей раскрытия эхолота либо из ГБО-подобных данных, синтезированных самим эхолотом, либо из конвертов ОР морского дна. Для получения мозаик ОР морского дна из перекрывающихся данных МЛЭ необходимо принимать во внимание и компенсировать влияние угла падения на силу ОР.

Рекомендации при изменении системных параметров и настроек. В работе показано, что собранные системами МЛЭ данные ОР в различных экспериментальных условиях могут быть скорректированы за геометрию луча, потери при передаче и системные параметры. Тем не менее могут иметь место остаточные артефакты, сохраняющиеся в результате либо аппроксимации зоны ОР к прямоугольнику, либо неправильного выбора настроек системы. Поэтому важно учитывать возможные последствия изменения системных настроек и параметров измерения силы ОР морского дна. В частности, важно учитывать следующие рекомендации.

1. Необходимо производить калибровку системы МЛЭ, особенно для определения коэффициента усиления отдельных лучей и системы в целом, полосы частот транзюсера и формы приемной и передающей диаграммы направленности. В идеале калибровка должна производиться в контролируемой среде с известными целями точным и хорошо контролируемым выравниванием антенны эхолота и целей.

2. Для того чтобы получить точные измерения силы ОР морского дна и их угловые зависимости, используя данные МЛЭ, необходимо знать:

- какой вид акустических характеристик сигналов ОР (огибающая ОР, интенсивность или уровень в дБ) фактически записывается аппаратным обеспечением эхолота;
- какой вид обработки (например, усреднение) применяется к сигналу ОР с помощью аппаратных средств эхолота до регистрации данных.

Описанный алгоритм измерения ОР должен быть скорректирован в соответствии с характеристиками ОР, регистрируемыми МЛЭ.

3. При сборе данных ОР соответствующим образом должны быть выбраны мощность, коэффициент усиления и длина импульса, чтобы фактические характеристики сигнала соответствовали ожиданиям от настроек и параметров системы.

При использовании этих рекомендаций измерения ОР будут зависеть только от свойств морского грунта, угла падения и частоты эхолота. В этом случае измеренные данные обратного рассеивания могут быть эффективно использованы для дистанционной классификации разных типов морских грунтов с использованием специализированного программного обеспечения.

Выводы

1. Рассмотрены методы записи и обработки данных ОР наряду со связанными с ними возможными ошибками на примере аппаратных средств МЛЭ «Reson 8125». Высокочастотные МЛЭ

прошлых поколений, такие как «Reson 8101», регистрируют данные ОР аналогичным образом, так что методы обработки и ошибки также применимы к ним. Более современные системы, такие как «Reson 7125», способны регистрировать данные полного эхо-сигнала ОР в каждом луче каждой посылки. Это означает, что характеристики ОР морского дна могут быть получены непосредственно от сигналов ОР, которые не искажены ограниченной длиной снippetов.

2. Согласно последним руководящим документам описания форматов компании Kongsberg [16], в системах МЛЭ Kongsberg серии ЕМ используются два типа данных ОР морского дна: сила ОР в децибелах, рассчитанная системой эхолота для вертикального и наклонного падения (только два значения за посылку), и конверты эхо-сигналов, записанные по каждому лучу, упоминающиеся как *данные изображения морского дна*.

3. Сила ОР морского дна вычисляется в соответствии со способом, описанным в публикации [17]. Данные изображения морского дна (эхо-конверты) записываются в логарифмическом формате в дБ и сосредоточены вокруг времени определения дна, ограничены им же по соседним лучам. Таким образом, данные ОР МЛЭ Kongsberg можно рассматривать как аналог снippetам систем «Reson». Соответственно обработка этих данных для измерения характеристик ОР может производиться аналогично обработке данных систем «Reson».

4. Длина изображений морского дна по каждому лучу недостаточна, особенно для вертикальных лучей, где она состоит всего лишь из нескольких измерений, так что они не включают в себя полный эхо-сигнал ОР дна. Следовательно, энергия ОР не может быть измерена точно. Для получения абсолютных значений силы ОР морского дна необходимо знать общий коэффициент усиления системы, для всех лучей и для изменений между отдельными лучами, на который оказывает влияние геометрия трандюсера и формирование лучей. Согласно технической документации МЛЭ «Kongsberg», все их последние системы полностью откалиброваны, что, вероятно, относится к данным изображения морского дна. Система «Reson» обычно не производит калибровки своих систем МЛЭ. Таким образом, необходимо производить калибровку согласно процедурам, описанным [13], для определения общего системного усиления и его изменения между отдельными лучами при необходимости выполнения измерений абсолютных значений силы ОР морского дна.

5. Практически все современные системы МЛЭ предоставляют возможность записи ГБО-подобных данных ОР морского дна. Для того чтобы получить представление о том, как эти данные связаны с фактическими свойствами ОР морского дна, включая статистические данные (например, средние значения и дисперсию), важно знать, как эти данные производятся системой МЛЭ. Акустическое ОР морского дна является случайным процессом с определенным распределением, которое зависит в основном от частоты МЛЭ, неровности морского дна и угла падения [14], [18]. Как отмечалось ранее, геометрия измерения ОР системы МЛЭ может исказить результат измерений и их статистику. Кроме того, обработка данных ОР, выполняемая аппаратными средствами МЛЭ, может исказить результаты измерений и их статистику неожиданным образом. Некоторые системы МЛЭ, такие, например, как «Reson Seabat», производят ГБО-данные с помощью бокового перекрытия данных от соседних лучей. Такая обработка искажает распределение ОР и, следовательно, его среднее значение и дисперсию [14]. Таким образом, наиболее подходящим способом синтеза ГБО-данных из конвертов ОР МЛЭ является исправление амплитуды огибающих образцов за диаграмму направленности по каждому лучу таким образом, чтобы уровнять перекрывающиеся образцы, а затем «сшить» вместе все конверты ОР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Moustier C. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam / C. de Moustier // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1986. — Vol. 79. — Is. 2. — Pp. 316–331. DOI: 10.1121/1.393570.
2. Kleinrock M. C. Capabilities of some systems used to survey the deep-sea floor / M. C. Kleinrock // CRC handbook of geophysical exploration at sea / ed. R. A. Geyer. — 2nd edition. — Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1992. — Pp. 35–86.

3. *Clarke J. E. H.* Processing and interpretation of 95 kHz backscatter data from shallow-water multibeam sonars / J. E. H. Clarke, L. A. Mayer, N. C. Mitchell, A. Godin, G. Costello // *OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings.* — IEEE, 1993. — Pp. 437–442. DOI: 10.1109/OCEANS.1993.326135.
4. *Talukdar K. K.* Interpretation of Sea Beam backscatter data collected at the Laurentian fan off Nova Scotia using acoustic backscatter theory / K. K. Talukdar, R. C. Tyce, C. S. Clay // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 1995. — Vol. 97. — Is. 3. — Pp. 1545–1558. DOI: 10.1121/1.412094.
5. *Augustin J. M.* Contribution of multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea bottom / J. M. Augustin, R. Le Suave, X. Lurton, M. Voisset, S. Dugelay, C. Satra // *Marine Geophysical Researches.* — 1996. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 459–486. DOI: 10.1007/BF00286090.
6. *Mitchell N. C.* Processing and analysis of Simrad multibeam sonar data / N. C. Mitchell // *Marine Geophysical Researches.* — 1996. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 729–739. DOI: 10.1007/BF00313883.
7. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
8. *Фирсов Ю. Г.* Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.
9. *Колосков Е. Н.* Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62.
10. *Кожухов И. В.* Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103.
11. *Колосков Е. Н.* Взаимосвязь гидрографии и геоэкологии в контексте глобальных климатических изменений в арктических морях и их последствия / Е. Н. Колосков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2016. — № 1 (35). — С. 66–75.
12. *SeaBat 8125. Ultra High Resolution Focused Multibeam Echosounder System. Operator's manual.* Version 3.01. — Goleta, California: RESON, Inc., 2002. — 134 p.
13. *Parnum I. M.* Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems: PhD thesis / I. M. Parnum. — Australia: Curtin University of Technology, 2007. — 208 p.
14. *Gavrilov A. N.* Fluctuations of seafloor backscatter data from multibeam sonar systems / A. N. Gavrilov, I. M. Parnum // *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* — 2010. — Vol. 35. — Is. 2. — Pp. 209–219. DOI: 10.1109/JOE.2010.2041262.
15. *Cochrane N. A.* Quantification of a multibeam sonar for fisheries assessment applications / N. A. Cochrane, Y. Li, G. D. Melvin // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2003. — Vol. 114. — Is. 2. — Pp. 745–758. DOI: 10.1121/1.1587151.
16. *Instruction Manual. EM Series Multibeam Echo Sounders. Datagram Formats.* Report No. 850-160692/N. — Kongsberg Maritime AS, 2010. — 106 p.
17. *Hammerstad E.* EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity / E. Hammerstad. — Horten, Norway: Kongsberg Maritime AS, 2000. — 5 p.
18. *Lyons A. P.* Statistical characterization of high-frequency shallow-water seafloor backscatter / A. P. Lyons, D. A. Abraham // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 1999. — Vol. 106. — Is. 3. — Pp. 1307–1315. DOI: 10.1121/1.428034.

DATA BACKSCATTER SEABED IMAGE IN MODERN MULTIBEAM ECHO SOUNDERS

Methods of processing multibeam sonar data, implemented in modern hydrographic systems, relate mainly to the bathymetry. However, modern multi-beam echo sounder can also receive and backscatter data. So far, there is no universal, standard approach for processing and interpretation of MBES backscatter data. Multibeam echosounder manufacturing companies use their own methods of primary processing of backscatter data and offer different methods of visualization of the data. All backscatter data collected by MBES systems are derived from backscatter intensity or from its square root, which is the instantaneous amplitude which is generally referred

to as “envelope”. To obtain estimates of the coefficient of the backscatter of the seabed and its angular dependence, it is important to know intensity or amplitude of the backscatter was recorded by echosounder. Currently, there are four possible ways of recording backscatter data used in modern multibeam sonar systems.

The aim of this work is to eliminate the uncertainty in the collection and processing backscatter seabed data.

The article deals with the existing methods of recording backscatter data used in modern high-frequency multibeam sonars, as well as related methods of processing of this data. The choice of acquisition method of backscatter data by MBES systems depends on the particular purpose of study or research of the seabed.

For mosaic seabed backscatter of overlapping MBES data, it is necessary to take into account and compensate for the effect of the angle of incidence on the power of signal. Review of existing approaches to this problem are beyond the scope of this article and is expected to present in the following works.

Additionally, the possible errors that can occur when processing backscatter data is described. Such errors are illustrated by data collected using «Reason SeaBat» MBES and other modern multibeam systems.

Keywords: detailed seabed topography, hydroacoustic, echo-signal, SSS, multibeam echo sounders, hydrographic information technologies, Reson, Kongsberg, water column, backscatter, snippets, marine geological research.

REFERENCES

1. De Moustier, Christian. “Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 79.2 (1986): 316–331. DOI 10.1121/1.393570.
2. Kleinrock, M. C. “Capabilities of some systems used to survey the deep-sea floor.” *CRC handbook of geophysical exploration at sea*, edited by R. A. Geyer. 2nd edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1992: 35–86.
3. Clarke, J. E. Hughes, L. A. Mayer, N. C. Mitchell, A. Godin, and G. Costello. “Processing and interpretation of 95 kHz backscatter data from shallow-water multibeam sonars.” *OCEANS’93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*. IEEE, 1993: 437–442.
4. Talukdar, Kushal K., Robert C. Tyce, and Clarence S. Clay. “Interpretation of Sea Beam backscatter data collected at the Laurentian fan off Nova Scotia using acoustic backscatter theory.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 97.3 (1995): 1545–1558. DOI: 10.1121/1.412094.
5. Augustin, J. M., R. Le Suave, X. Lurton, M. Voisset, S. Dugelay, and C. Satra. “Contribution of multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea bottom.” *Marine Geophysical Researches* 18.2 (1996): 459–486. DOI: 10.1007/BF00286090.
6. Mitchell, Neil C. “Processing and analysis of Simrad multibeam sonar data.” *Marine Geophysical Researches* 18.6 (1996): 729–739. DOI: 10.1007/BF00313883.
7. Firsov, Y. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov. Uchebnoe posobie*. SPb.: Nestor-istoriya, 2010.
8. Firsov, Yu. G., M. V. Ivanov, and E. N. Koloskov. “The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations - Kara sea example.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.
9. Koloskov, E. N., and Y. G. Firsov. “Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62.
10. Kozhuhov, I. V., E. N. Koloskov, and Y. G. Firsov. “Electronic engineering hydrography and the prospects of obtaining new results on the morphology and bottom environmental conditions of the arctic seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 95–103.
11. Koloskov, E. N. “The interdependence of hydrography and marine ecology in the context Arctic seas climate change and its consequences.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 66–75.
12. *SeaBat 8125. Ultra High Resolution Focused Multibeam Echosounder System. Operator’s manual. Version 3.01*. Goleta, California: RESON, Inc., 2002.
13. Parnum, I. M. Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems. PhD thesis. Australia: Curtin University of Technology, 2007.
14. Gavrilov, Alexander N., and Iain M. Parnum. “Fluctuations of seafloor backscatter data from multibeam sonar systems.” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 35.2 (2010): 209–219. DOI: 10.1109/JOE.2010.2041262.

15. Cochrane, Norman A., Y. Li, and G. D. Melvin. "Quantification of a multibeam sonar for fisheries assessment applications." *The Journal of the Acoustical Society of America* 114.2 (2003): 745–758. DOI: 10.1121/1.1587151.
16. *Instruction Manual. EM Series Multibeam Echo Sounders. Datagram Formats*. Report No. 850-160692/N. — Kongsberg Maritime AS, 2010.
17. Hammerstad E. *EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity*. Horten, Norway: Kongsberg Maritime AS, 2000.
18. Lyons, Anthony P., and Douglas A. Abraham. "Statistical characterization of high-frequency shallow-water seafloor backscatter." *The Journal of the Acoustical Society of America* 106.3 (1999): 1307–1315.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колосков Евгений Николаевич — аспирант.
Научный руководитель:
Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
evgenklskv@mail.ru
Корнипаев Борис Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kornipaevboris@hotmail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koloskov Evgeniy Nikolayevich — postgraduate.
Supervisor:
Firsov Jury Georgievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
evgenklskv@mail.ru
Kornipaev Boris Aleksandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Firsov Jurij Georgievich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kornipaevboris@hotmail.ru

Статья поступила в редакцию 20 октября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112
УДК 528.47

И. Ю. Королев

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПУТИ СУДНА ОТ ОБСЛЕДОВАННОЙ ПОЛОСЫ

Статья посвящена проблеме разработке количественных показателей и методик оценки безопасного плавания по высокоширотным трассам Северного морского пути (СМП). В ней рассмотрены навигационные особенности арктического мореплавания. Приведены сравнительные статистические данные об интенсивности судоходства в периоды летне-осенней и зимне-весенней навигации в восточном и западном секторах Арктики. Отмечены основные тенденции и перспективы СМП, связанные с увеличением интенсивности арктического судоходства и увеличением доли крупнотоннажных судов. Приведен обзор методов оценки вероятности навигационных аварий, связанных с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна. Отмечается, что в условиях мелководья и недостаточной изученности рельефа дна движение судов в акватории СМП организовано по рекомендованным маршрутам, а движение крупнотоннажных судов — по полосам, в пределах которых выполнено площадное обследование. Поставлен вопрос о допустимом отклонении пути судна от рекомендованной полосы движения. Перечислены условия, при которых решение этого вопроса приобретает важное практическое значение. Для оценки допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы предложено использовать метод статистического прогнозирования временных трендов, адаптированный к задачам проектирования арктических водных путей с учетом геоморфологических особенностей шельфа арктических морей. В работе определены необходимые критерии и приведены основные расчетные формулы, позволяющие оценить величину допустимого отклонения пути судна вправо и влево от обследованной полосы в зависимости от её ширины, характера рельефа дна и уровня доверительной вероятности. Приведены основные

результаты анализа полученных формул. Дана общая оценка разработанного метода и определены направления его совершенствования.

Ключевые слова: Северный морской путь, площадное обследование, отклонение пути судна, минимальные глубины, доверительный интервал

Введение

В соответствии с Федеральным законом от 28 июля 2012 г. № 132-ФЗ [1, ст. 5.1] к акватории Северного морского пути (СМП) относится «...водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации и ограниченное с востока линией разграничения морских пространств с Соединенными Штатами Америки и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота, Югорский Шар». СМП проходит через Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, связанные проливами архипелагов Северная Земля и Новосибирские острова. Арктические моря в основном мелководны, что подтверждается данными, приведенными в работах [2], [3]. Мелководье и тяжёлые ледовые условия являются основными отличительными особенностями навигации в арктических морях.

В ближайшей перспективе в акватории СМП ожидается существенное увеличение интенсивности судоходства, в том числе крупнотоннажных судов с большой осадкой [4] – [7] в режиме круглогодичной навигации по всей трассе СМП. Такой рост в настоящее время отмечен в Карском море. По данным Администрации Северного морского пути [8] число судов, работавших в Карском море в 2015 г., увеличилось в летнюю навигацию на 24 %, в зимнюю — на 242 % по сравнению с 2013 г. При этом количество судов, получивших разрешение для работы в восточном секторе акватории СМП за тот же период в летнюю навигацию, сократилось в 2 раза, а в зимнюю навигацию увеличилось в 5 раз. В 2015 г. примерно 80 % всех судов, работающих на акватории СМП, находилось в Карском море.

Интенсивность судоходства в восточном секторе Арктики, к которому относятся моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское, в 3 – 4 раза ниже интенсивности судоходства в Карском море. Судоходство в зимне-весенний период здесь практически приостанавливается. В 2013 г. для работы в восточном секторе в зимний период разрешение получили шесть судов, в 2015 г. — 32 судна, в том числе шесть ледоколов. Среди этих судов в основном суда, имеющие осадку не более 6 м.

Арктические моря восточного сектора характеризуются сложными навигационными условиями как по глубинам, так и по ледовой обстановке. Очевидно, что в условиях мелководья увеличение осадки судов ведет к росту вероятности касания грунта и посадки на мель.

Объем статистических данных об авариях судов в акватории СМП не позволяет дать их апостериорную оценку. В таких случаях для оценки вероятности Международная морская организация (ИМО) рекомендует [9] использовать экспертные оценки, а также физические, аналитические модели и имитационное моделирование. Среди работ, посвященных оценке вероятности посадки судна на мель, следует выделить работы [3], [10] – [13]. Метод уровней множеств, который предложено использовать в работе [10], относится к универсальным методам, основанным на мнениях экспертов. При этом вопрос о количестве экспертов и их квалификации остается во многих случаях открытым. Принимаемое решение и оценки носят субъективный характер. Процедура оценки кажется сложной и трудоемкой.

Достаточно продуктивным представляется подход к решению задачи об оценке вероятности посадки судна на мель, основанный на теории геометрических вероятностей [3], [11] – [13]. При таком подходе точность оценок зависит от ряда исходных допущений. Подводный рельеф представляется в виде плоскости с наложенными на неё локальными поднятиями, имеющими форму усе-

ченных сферических сегментов. Размеры сегментов могут быть произвольными, но для каждого из них соотношение высоты и диаметра принимаются постоянными.

Постановка задачи исследования

Плавание судов в акватории СМП организовано по рекомендованным маршрутам, для каждого из которых установлена рекомендованная предельная осадка судна. Для крупнотоннажных судов с осадкой до 15 м рекомендованные маршруты представляют собой полосы шириной 2 км, в пределах которых выполнено площадное обследование [14]. Эти маршруты начали использоваться с 2013 г. При этом возникает вопрос о допустимом отклонении пути судна от рекомендованной полосы движения. Задача представляет не только научное, но и практическое значение, так как при плавании в ледовых условиях или проведении аварийно-спасательных мероприятий выход судна за пределы обследованной полосы становится неизбежным.

Величина допустимого отклонения в общем случае зависит от ряда факторов, к которым относятся:

- величина отклонения;
- ширина обследованной полосы;
- глубины и характер рельефа в обследованной полосе;
- гидрографическая изученность окружающего полосу рельефа дна;
- осадка судна.

Разработка и обоснование оценки допустимого отклонения пути судна

Введем систему координат: ось OX совпадает с направлением полосы обследования; ось OY перпендикулярна направлению полосы (рис. 1).

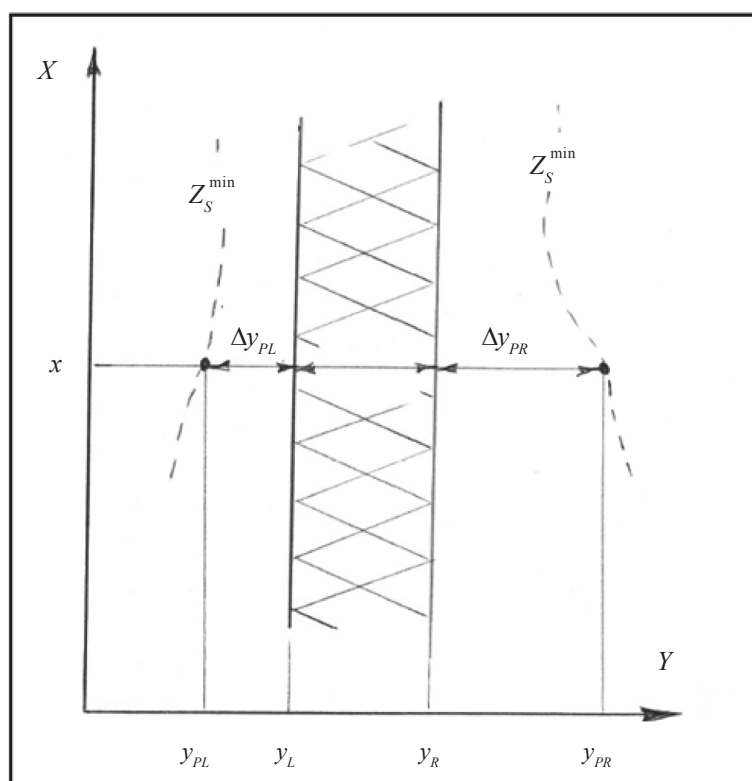


Рис. 1. Схема взаимного расположения обследованной полосы и точек допустимого отклонения

В полосе $y_L \leq y \leq y_R$, где y_L, y_R — соответственно ординаты левой и правой границ полосы. На всей её протяженности выполнена площадная съёмка рельефа дна, в результате которой измерены глубины, которые могут быть заданы в виде

$$Z_S = Z_S(x, y_L \leq y \leq y_R). \quad (1)$$

Проходные глубины в полосе $y_L \leq y \leq y_R$ связаны с минимальной глубиной, которая была обнаружена в процессе съемки. Поэтому значение минимальной глубины является важной характеристикой маршрута движения судна. Для минимальной глубины используем следующее обозначение:

$$Z_S^{\min} = \min\{Z_S(x, y_L \leq y \leq y_R)\}. \quad (2)$$

Задача оценки допустимого отклонения пути судна Δy_{PR} справа от полосы $y_L \leq y \leq y_R$ и Δy_{PL} слева от нее сводится к определению такого максимального отклонения от обследованной полосы, на котором глубина с высокой степенью уверенности не представляла бы опасность для мореплавания, т. е. не была бы меньше, чем $Z_S^{\min}$ (рис. 2).

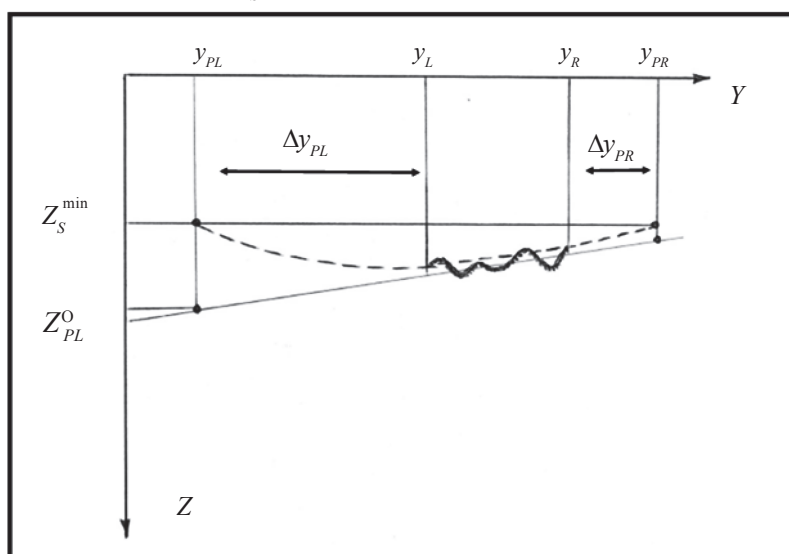


Рис. 2. Глубины и точки боковых отклонений

Отклонения Δy_{PR} и Δy_{PL} определяются разностями ординат:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{PR} &= y_{PR} - y_R \\ \Delta y_{PL} &= y_L - y_{PL} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где y_{PR} и y_{PL} — соответственно ординаты точек допустимого отклонения пути судна справа и слева от обследованной полосы.

Методы регрессионного анализа [15], [16] позволяют определить наклон дна в пределах полосы $y_L \leq y \leq y_R$ по направлению OY для фиксированных профилей при $x = \text{const}$. С учетом того, что углы наклона рельефа дна на шельфе арктических морей и в зоне высокоширотной трассы, в частности, малы и, как правило, не превышают 0,001 [17], для описания профилей используем линейное уравнение регрессии:

$$Z^0 = a + b(y - y_L). \quad (4)$$

Допустим, что глубины в интервале $y_L \leq y \leq y_R$, разбитом на n частей, подчинены нормальному закону распределения. Тогда коэффициенты a и b с использованием метода наименьших квадратов могут быть вычислены по формулам [15]:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (Z_{Si} - \bar{Z}_S)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \\ a &= Z - b(y = y_L), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\bar{y}$ — среднее значение измеренного параметра.

Выражение (4) предлагается использовать для оценки глубин Z_{PR}^o и Z_{PL}^o соответственно в точках допустимого отклонения y_{PR} и y_{PL} .

Измеренные на интервале $y_L \leq y \leq y_R$ глубины Z_S отклоняются от линейного уравнения регрессии (4), а кроме того, коэффициенты уравнения (4) сами имеют некоторые погрешности. В этой связи оценка глубин в точках допустимого отклонения должна учитывать неопределенность, связанную не только с наклоном дна, но и с возможностью её отклонения от него в некотором доверительном интервале. При этом размеры доверительного интервала должны изменяться в зависимости от величины отклонения.

Коэффициенты (5) уравнения регрессии (4) рассчитываются по ограниченной выборке, поэтому при оценке границ доверительного интервала рекомендуется [15] использовать t -статистику Стьюдента, связанную с вероятностной оценкой допустимого отклонения P .

Доверительные интервалы глубин в точках отклонения вправо и влево от полосы в этом случае определяются с помощью выражения

$$Z_{PR(PL)} = Z_{PR(PL)}^o \pm t_p \cdot \Delta Z_{PR(PL)}, \quad (6)$$

в котором средние квадратические ошибки ΔZ_{PR} и ΔZ_{PL} вычисляются по формуле

$$\Delta Z_{PR(PL)} = \Delta Z_S^o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_{PR(PL)} - \bar{y})^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

где Z_S^o — среднее квадратическое отклонение измеренных глубин от линии регрессии (4).

При оценке допустимого отклонения в учет принимаются только наименьшие допустимые глубины, поэтому в правой части уравнения (6) оставим только знак «минус». Подставив в формулу (6) значение минимальной глубины (2), с учётом выражения (4) получим

$$Z_S^{\min} = a + b(y_{PR(PL)} - y_L) - t_p \cdot \Delta Z_S^o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_{PR(PL)} - \bar{y})^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (8)$$

Для определения допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы следует решить уравнение (8) относительно неизвестной $y_{PR(PL)}$.

С учетом того, что уравнение (4) в общем случае представляет собой наклонную прямую линию, допустимые отклонения маршрута вправо и влево от обследованной полосы отличаются между собой. Допустимое отклонение уменьшается в сторону уменьшения глубин и увеличивается в противоположную сторону.

Оценка допустимого отклонения уменьшается при возрастании её уровня доверительной вероятности, что определяется значением коэффициента t_p . Так, при изменении вероятности от 0,68 до 0,95 коэффициент t_p возрастает примерно в два раза, что влечет за собой такое же уменьшение оценки допустимого отклонения. Оценка допустимого отклонения маршрута увеличивается на участках с выровненным рельефом, когда измеренные глубины мало отличаются от профиля (4).

Выводы

1. Перспективы развития Северного морского пути напрямую связаны с развитием сети безопасных рекомендованных маршрутов движения судов, в том числе сети маршрутов, предназначенных для плавания крупнотоннажных судов.

2. Движение и маневрирование крупнотоннажных судов исключительно в пределах обследованных полос, имеющих ограниченную ширину в условиях ледового плавания, проведение спасательных операций при наличии также других обстоятельств не представляется возможным,

так как неизбежно связано с выходом судна за установленные пределы. В этой связи обоснование допустимого безопасного отклонения пути судна от рекомендованного маршрута в условиях арктической навигации имеет важное практическое значение.

3. Разработанный метод позволяет дать количественную оценку допустимого отклонения пути крупнотоннажного судна от рекомендованного высокоширотного маршрута, представляющего собой полосу, в пределах которого выполнено площадное обследование рельефа дна при заданном уровне доверительной вероятности и установленном значении проходной глубины.

4. Метод может быть использован при проектировании и эксплуатации судоходных трасс в акваториях с недостаточной гидрографической изученностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 132-ФЗ от 28.07.2012. О внесении в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути.

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

3. Афонин А. Б. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съемки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.

4. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ 18.09.2008 № ПР-1969).

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. 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.

7. 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.

8. Администрация Северного морского пути [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Режим доступа: <http://asmp.morflot.ru/> (дата обращения: 23.06.16).

9. International Maritime organization (IMO). Maritime Safety Committee // Formal Safety Assessment, Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process/ MSC/ Circ. 1023-MEPC/Circ. 392. — May 2007.

10. 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.

11. Тезиков А. Л. Оценка плотности распределения вероятности локальных поднятий дна в междугалсовом пространстве / А. Л. Тезиков, С. В. Решетняк // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 111–115.

12. Решетняк С. В. Метод численной оценки параметров локальных поднятий поверхности морского дна при выполнении морского промера / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков, В. Ю. Бахмутов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 116–119.

13. 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.

14. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения – 23.06.2016).

15. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. — Издат. дом «Вильямс», 2007. — 912 с.

16. Дуброва Т. А. Статистические методы прогнозирования в экономике / Т. А. Дуброва. — М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2003. — 50 с.

17. Алексеев С. П. Арктический шельф России — новые представления о рельефе дна бассейна / С. П. Алексеев, И. С. Грамберг, А. А. Комарицын, Г. Д. Нарышкин // Навигация и гидрография. — 2001. — № 12. — С. 9–13.

EVALUATION OF THE TOLERANCE PATH OF THE VESSEL FROM THE SURVEYED STRIP

The main trends and prospects of the NSR associated with the increase in the intensity of arctic-delivery of navigation and to increase the share of large vessels. An overview of the methods estimating the probability of navigational accidents associated with a lack of hydrographic knowledge of the bottom topography. It is argued that in shallow water conditions and a lack of knowledge of the bottom topography and the movement of suing in the waters of the NSR is organized according to the recommended routes and the movement of large vessels - of the bands within which the areal survey. The question of the permissible deviation of the path of the vessel from the recommended lane. Lists the conditions under which the solution of this question has an important practical value. To estimate the permissible deviation of the path of the vessel from the surveyed strip line but to use the method of statistical forecasting of temporal trends, adapted to the task of designing the Arctic waterways taking into account geomorphological features of the shelf of the Arctic seas. The study also identified the necessary criteria and the basic calculation formulas to assess the value of the permissible deviation of the path of the ship to the right and to the left from the surveyed strips depending on its width, character of the bottom relief and of the confidence level. The main results of the analysis of the obtained formulas. In conclusion, the article gives a General assessment of the developed method and the directions of its improvement.

Keywords: Northern sea route, areal survey, the deviation of the path of the vessel, the minimum depth, the confidence interval

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal law № 132-FZ. 28 July 2012. O vnesenii v otdelnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federacii v chasti gosudarstvennogo regulirovanija torgovogo moreplavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.
2. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic sees underwater relief of Russia." *Geodesy and cartography* 4 (2006): 57–60.
3. Afonin, A. B, E. O. Ol'hovik, and A. L. Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4 (38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
4. Russian Federation. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Approved by the by the President of Russian Federation 18 September 2008.
5. Smirnov, A. A. and S. A. Golovinsky. "55th Anniversary of the Russian Nuclear Icebreaker Fleet and Development of the Northern Sea Route." *Arctic: ecology and economy* 4(16) (2014): 108–114.
6. 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.
7. Zbarashhenko, V. S. "Arkticheskaja kontejnernaja linija Murmansk – Petropavlovsk – Murmansk." *Vtoraja mezhdunarodnaja konferencija «Transport i logistika v Arktike – 2016»*. M., 2016: 61–67.
8. The Northern sea route Administration. Web. 23 June 2016 <<http://asmp.morflot.ru/>>.
9. International Maritime organization (IMO). Maritime Safety Committee// Formal Safety Assessment, Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process MSC/ Circ. 1023-MEPC/Circ. 392. May 2007.
10. 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 admiral S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
11. Tezikov, L. A., Reshetnyak, S. V. "Esimat of Density of Distribution for Local Bottom Rises Probabilities in the Survey Line Spacing." *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 111–115.

12. Reshetnyak, S. V., A. L. Tezikov, and V. Y. Bakhmutov. "Method of Numerical Evaluation of Parameters for the Local Sea Bottom Rises When Conducting the Sea Survey." *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 116–119.
13. 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.
14. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 23 June 2016 <<http://www.hydro-state.ru/>>.
15. Drejper, N., and G. Smit. *Prikladnoj regressionnyj analiz*. Izdatelskij dom «Viljams», 2007.
16. Dubrova, T. A. *Statisticheskie metody prognozirovaniya v jekonomike*. M.: Moskovskij mezhdunarodnyj institut jekonometriki, informatiki, finansov i prava, 2003.
17. Alekseyev, S. P., I. S. Gramberg, A. A. Komaritsyn, and G. D. Naryshkin. "Arctic shelf of Russia — new forms of presentation of the bottom relief." *Navigation and Hydrography* 12 (2001): 9–13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королев Иван Юрьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
i.korolev@fertoing.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev Ivan Jurevich — postgraduate.
Supervisor:
Tezikov Aleksandr L'vovich —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
i.korolev@fertoing.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2016 г.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-113-120

УДК 678,67.014,67.017,67.019

Е. Н. Белецкий

СПЕЦИФИКА РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ВАЛОПРОВОДОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИКАТОРОВ МАТРИЦЫ

В статье рассмотрен новый трехуровневый подход к моделированию и расчету параметров напряженно-деформированного состояния элементов конструкции из полимерных композиционных материалов, обладающих явно выраженной анизотропией физико-механических свойств. Данные конструкции из полимерных композиционных материалов в виде тел вращения (валопроводы, оболочки, сосуды под давлением и т. д.) находят широкое применение в судостроении. У подобных композиционных материалов имеются существенные преимущества по сравнению с традиционно используемыми для этих целей сплавами металлов, поскольку они обладают меньшим весом, нечувствительны к локальным дефектам, а самое главное — более долговечны и для отдельных конструкций технологичны. При решении инженерных задач необходимо достаточно точно оценивать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкционного композиционного материала, а также возможности их регулирования. На каждом уровне расчета производится оценка собственных зависимостей, которые в итоге определяют функцию итогового напряженно-деформированного состояния композиционного материала в рассматриваемой конструкции: уровень 1 — общий подход оценки НДС в зависимости от главных осей, уровень 2 подразумевает учет адгезионных характеристик матрицы и армирующего волокна, на уровне 3 оценивается влияние наполнителей и модификаторов в матрице. В статье изложены результаты, которые показывают, что в разных плоскостях (0° , 45° , 90°), в зависимости от условной оси симметрии укладки волокна при намотке, существенно меняются постоянные упругости, причем они могут иметь несколько экстремальных значений в зависимости от сочетания величин модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации. Приведены зависимости и отдельные результаты расчетов, а также построенные на их основе эпюры, например по оси OX , подтверждающие анизотропию свойств основных физико-механических характеристик композиционного материала. В целом предложенная теория после дополнительных экспериментальных исследований может быть адаптирована не только для расчета тел вращения, полученных методом намотки, но и для других конструктивных исполнений, например методом прессования.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование, расчет напряжений, тела вращения, угольное волокно, механическое разрушение, граничные условия, модификатор, адгезия, весовые коэффициенты.

Введение

В современном судостроении широкое применение находят изделия из композиционных полимерных материалов (ПКМ), исходные заготовки которых получены методом намотки [1] — [3]. К подобным конструкциям могут быть отнесены различные оболочки в виде сосудов под жидкости или газы. Перспективным направлением является изготовление элементов, передающих крутящий момент в виде валопроводов заданной длины и конфигурации. Такой интерес к изделиям из ПКМ обусловлен возможностью создания материалов с заданными физико-механическими характеристиками под конкретные эксплуатационные свойства. Подобные характеристики могут быть заранее обеспечены в ходе технологического процесса намотки и укладки армирующего материала.

Композиционные материалы на основе эпоксидных, фенольных и полимерных связующих сочетают в себе высокую прочность с относительно небольшой плотностью, хорошую стойкость к динамическим нагрузкам и резким перепадам температур, высокую химическую стойкость. Вы-

сокопрочные стеклянные и угольные волокна обеспечивают прочность и жёсткость композита, синтетическое связующее придает материалу монолитность и заданную форму. Матрица способствует более эффективному использованию прочностных свойств армирующих волокон, создает протекторную защиту волокна от внешних воздействий, а также сама воспринимает часть усилий, развивающихся в материале при работе на сжатие. В практике могут быть использованы нити из углерода, бора, асбеста, базальта, керамики. Однако при массовом применении только армирование стекло- и угольным волокном обеспечивает высокую прочность и сравнительно низкую стоимость изделия. Кроме этого, целесообразно использовать комбинированные композиты, поскольку формообразующая часть конструкции может быть армирована стекловолокном, а наиболее нагруженная — содержать угольное волокно.

Одним из положительных качеств ПКМ, армированных стекло- и угольным волокном, является их низкая чувствительность к надрезам, трещинам и другим подобным дефектам, создающим концентраторы напряжений [4]. Для сравнения — традиционно используемые стальные сплавы для изготовления валопроводов при напряжениях, близких к предельному значению предела текучести при растяжении, имеют более высокую чувствительность к крутильным колебаниям, а также склонность к зарождению концентраторов напряжения и последующему катастрофическому разрушению.

При решении инженерных задач необходимо достаточно точно оценивать параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкционного композиционного материала, а также возможности их регулирования [5], [6]. Так, пассивное регулирование параметров НДС возможно за счёт дифференцированной оценки и использования физико-механических характеристик материала, анизотропии свойств, а также за счёт изменения геометрии объекта при нагружении и разгрузке конструкции. В свою очередь, активное регулирование параметров НДС происходит за счёт обратной связи, позволяющей перестроить геометрические схемы в соответствии с видом нагрузок, изменить плотность материала и модули упругости. В итоге обеспечивается оптимальный режим работы конструкции во времени.

ПКМ в виде заготовок (полых валов) и готовых изделий поддаются лишь пассивному регулированию, поскольку выполнены из реактопластов и изменению геометрических форм и направления армирования в процессе эксплуатации не подвержены. Получение математической модели НДС технологически оформленного ПКМ как композита с заданными фиксированными свойствами и уже не изменяющегося во времени позволит управлять параметрами НДС в заготовках и изделиях из ПКМ, предназначенных для судостроения.

Постановка задачи

Рассматривается расчетная методика параметров НДС цилиндрического сечения, полученного методом намотки, произведенного из композиционного материала, армированного стекловолокном или угольным волокном с эпоксидной матрицей и порошковым модификатором различного масштабного уровня размерности. Элемент выполнен с армированием в растянутой зоне.

При расчете используем основные допущения:

- характеристики композита в заготовке, на контактных поверхностях матрицы и модификатора однородны и не отличаются от основного материала;
- матрица однородна по составу и обладает изотропными свойствами по всему объёму среды (показатели обеспечиваются технологией приготовления состава матрицы);
- матрица обладает разномодульностью и нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями в сжатой зоне;
- модификатор (наполнитель) состоит из частиц, размер которых колеблется в пределах от 0,0001 мм до 0,01 мм, их свойства считаем изотропными;
- материал в составе композита подчиняется закону Гука вплоть до разрушения;
- при исследовании упругой зоны композит работает с уровнем напряжений, не превосходящим его длительную прочность.

*Расчет постоянных характеризующих НДС
вдоль наиболее нагруженных направлений*

В работах [6], [7], в частности, установлено, что волокна стеклопластика можно ориентировать в заготовке изделия при намотке в направлении наибольших напряжений, чем будет достигнута самая большая прочность в отношении действующих максимальных нагрузок. Так, работы [6] – [8] посвящены исследованиям анизотропных материалов, в том числе из композитов, а также расчетам оболочек и цилиндрических конструкций из этих материалов. В них приведены уравнения для упругих постоянных в зависимости от направления выбранных осей X, Y . В случае валопроводов выбранные оси X, Y будут главными осями анизотропии, тогда $E_x = E_r; E_y = E_t; G_{xy} = G_{rt}; \mu_{xy} = \mu_{rt}$. Тогда зависимости для постоянных упругости примут вид:

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \left(\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_t}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_{y'}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_r} + \left(\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_t}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = 4 \left(\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_t} + \frac{2\mu_{rt}}{E_r} - \frac{1}{G_{rt}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}; \quad (3)$$

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\left(\frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_t} + \frac{2\mu_{rt}}{E_r} - \frac{1}{G_{rt}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right]; \quad (4)$$

$$\nu_{x',x'y'} = -\frac{\cos^3 \theta \sin \theta}{E_r} + \frac{\sin^3 \theta \cos \theta}{E_t} + \frac{\cos^3 \theta \sin \theta}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r}. \quad (5)$$

Из формул можно исключить коэффициент поперечной деформации, тогда зависимости характеристик определяющих НДС примут вид:

– для модуля упругости

$$E_{x'} = E_t / \left[\alpha^2 \cos^4 \theta + \sin^4 \theta + \left(\frac{4E_t}{E_{xy}^{(45)}} - \alpha^2 - 1 \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right]; \quad (6)$$

– для модуля сдвига

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{\cos^2 2\theta}{G_{rt}} + \frac{\sin^2 2\theta}{G_{xy}^{(45)}}. \quad (7)$$

Для модуля упругости в направлении 45° $E_{xy}^{(45)}$ используем уравнение

$$\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} = \frac{4}{E_{xy}^{(45)}} - \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_t}, \quad (8)$$

где входящие элементы представлены в виде $\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}}{E_r} = \frac{B}{E_t}$ или $B = \frac{E_t}{G_{rt}} - 2\alpha^2 \mu_{rt}$.

Зависимость (6) физически указывает на связь между упругими постоянными в плоскости $X'Y'$ для анизотропного тела из ПКМ в виде цилиндрического полого вала. В работе [8] приведено решение дифференциального уравнения в частных производных четвертого порядка для цилиндрически анизотропного тела, которое может быть адаптировано для расчета полого вала из ПКМ. В полиномах это соотношение принимает вид, который удовлетворяет этому дифференциальному уравнению:

$$B = 3 - \alpha^2. \quad (9)$$

После преобразований и подстановки можно получить равенство

$$\frac{3-\alpha^2}{E_t} = \frac{4}{E_{xy}^{(45)}} - \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_t}. \quad (10)$$

После дальнейшего преобразования получим

$$E_{xy}^{(45)} = E_t. \quad (11)$$

Тогда уравнение (6) для модуля упругости можно записать в виде

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + \frac{3-\alpha^2}{E_t} \cos^2 \theta \sin^2 \theta; \quad (12)$$

– для коэффициента Пуассона

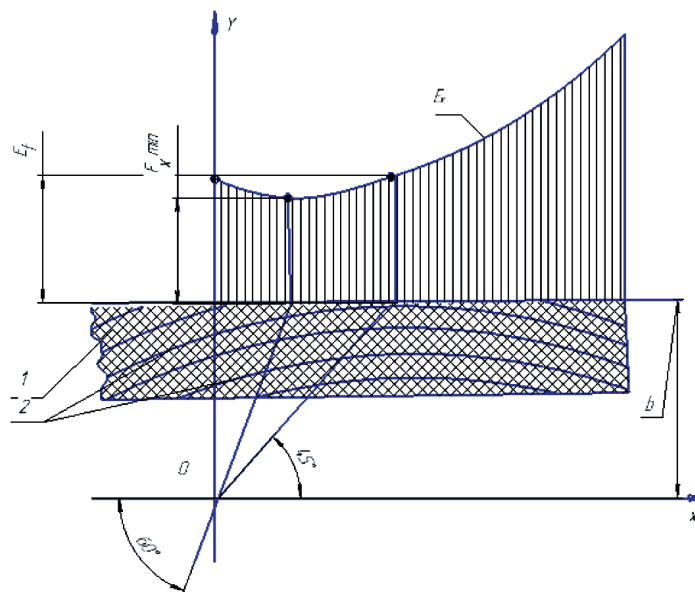
$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\frac{2(\alpha^2 - 1)}{E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right]; \quad (13)$$

– для коэффициента взаимного влияния

$$v_{x',x'y'} = \left(-\frac{\cos^2 \theta}{E_r} + \frac{\sin^2 \theta}{E_t} + \frac{\cos^2 \theta}{G_{rt}} \right) \sin \theta \cos \theta - \frac{2\mu_{rt}}{E_r}. \quad (14)$$

Функция, представленная выражением (12), имеет два экстремума (при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 90^\circ$), которые соответствуют главным плоскостям анизотропии.

В работах [7], [8] получен результат, показывающий, что при $\theta = 45^\circ$ модуль поперечной упругости составляет величину, равную E_t . На рисунке представлено изменение модуля упругости цилиндрически анизотропного тела в направлении оси X .



Изменение составляющей модуля упругости E_x в направлении оси X [7]:
1 — матрица; 2 — направление армирующих волокон углепластика

В декартовых координатах формулу (12) можно переписать в виде

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\alpha^2 x^4 + y^4 + (3-\alpha^2) x^2 y^2}{E_t (x^2 + y^2)^2}. \quad (16)$$

Модуль сдвига с учетом полученной нами взаимосвязи между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии $B = 3 - \alpha^2$ можно вычислить по формуле, полученной после преобразования (12):

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{8(\alpha^2 - 1)}{E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}}. \quad (17)$$

Приравняв выражения $B = 3 - \alpha^2$ и $B = \frac{E_t}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}E_t}{E_r}$, получим

$$3 - \alpha^2 = \frac{E_t}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{rt}E_t}{E_r} \text{ или } G_{rt} = \frac{E_t}{3 - \alpha^2 + 2\mu_{rt}}. \quad (18)$$

Уравнение (17) связывает между собой три постоянных упругости в главных направлениях анизотропии для цилиндрически анизотропного тела — элемента валопровода, выполненного из ПКМ.

Государственными стандартами предусмотрено экспериментальное определение (13) величин характеристик упругости ($3E_i$, $3G_{ik}$, $3\mu_{ik}$, $3E_{ik}^{(45)}$, $3\mu_{ik}^{(45)}$) для цилиндрически анизотропных тел.

По результатам испытаний определяют модули сдвига по формуле

$$G_{ik} = \frac{E_{ik}^{(45)}}{2(1 + \mu_{ik}^{(45)})}. \quad (19)$$

Установленная взаимосвязь ($B = 3 - \alpha^2$) между упругими постоянными в отдельном случае позволяет исключить экспериментальное определение $E_{ik}^{(45)}$, $\mu_{ik}^{(45)}$ (испытания образцов под 45°). Для определения упругих постоянных достаточно знать их величины относительно главных осей анизотропии ($3E_i$, $3\mu_{ik}$, $3\mu_{ki}$). По этим данным, используя полученные формулы, можно найти значения упругих постоянных относительно любого положения осей.

Расчет постоянных характеризующих НДС с учетом адгезионной прочности взаимодействия полимерной матрицы и армирующего волокна

Одним из главных критериев при расчетах параметров НДС являются параметры взаимодействия материала матрицы с поверхностью армирующего волокна (углеродного, стекловолокна), причем от адгезионной прочности взаимодействия полимерной матрицы [4], [5] существенно зависят характеристики композита: продольная, поперечная и сдвиговая прочность, вязкость разрушения, модуль упругости, термостойкость и др. В таблице (по данным работ [4], [5]) приведены значения адгезионной прочности перспективных ПКМ для судостроения, используемых в качестве связующих для композитов и изделий из них при диаметре волокна $d = 9$ мкм и площади сечения $S = 6 \cdot 10^{-3}$ мм².

Примеры вариантов адгезионной прочности материала матрицы ПКМ

Связующее	Параметры адгезионной прочности	
	углеродное волокно	стеклянное волокно
Эпоксидиановое ЭДТ-10	41,5	40,0
Эпоксифенольное 5-211	41,0	41,0
Эпокситрифенольное ЭТФ	43,0	—
УП-612	40,5	—
ДОДЦПД	43,0	—
Полиамидное СП-6	34,0	30,0

В рассматриваемых вариантах адгезионные прочности различных эпоксидных связующих близки между собой и в отдельных конкретных случаях не зависят от материала каркаса — волокна.

Модуль упругости композита E_k может быть выражен в данном случае зависимостью, характеризующей аддитивность [4] вклада волокна, матрицы и межфазного слоя:

$$E_k = E_{a a a} + E_{i a i} + E_{m a m}, \quad (20)$$

где $E_{a a a}$ — модуль Юнга армирующего материала и его объемная доля, МПа; $E_{i a i}$ — модуль Юнга межфазного слоя и его объемная доля, МПа; $E_{m a m}$ — модуль Юнга материала матрицы и его объемная доля, МПа.

При рассмотрении элемента наполненного полимера с цилиндрическим включением (волокон) можно использовать выражение [4]

$$E = E_a (r_a^2 / r_m^2) + E_i [(r_i^2 - r^2) / r_m^2] + E_m [(r_m^2 - r_i^2)], \quad (21)$$

где r_a — величина радиуса армирующего материала; r_i — величина радиуса межфазного слоя; r_m — величина радиуса матрицы.

Масштабный уровень модуля упругости межфазного слоя может быть представлен выражением [4]:

$$E_i(r) = E_m + E_f(r_f / r)\eta_1 - E_m(r_f / r)\eta_2. \quad (22)$$

В случае граничных условий ($r = r_i$) имеем уточненный вид зависимости (22):

$$E_i(r_i) = E_m + E_a(r_a / r_i)\eta_1 - E_m(r_a / r_i)\eta_2. \quad (23)$$

В этих соотношениях экспоненты η_1 и η_2 являются характеристиками адгезии, определяющими передачу напряжений от матрицы к наполнителю.

Расчет постоянных, характеризующих НДС с учетом наполнителей в матрице

Для отдельных задач возможно использование ПКМ с модификаторами разного уровня фракционного состава и размерности: микроуровень — 10^{-3} мм, мезоуровень — 10^{-6} мм, и наноуровень — 10^{-9} мм [9]. В работе [10] рассмотрена методика аналитического определения физико-механических характеристик новых модифицированных ПКМ, основанная на учете свойств его составляющих, согласно которой суммарный модуль упругости и суммарный коэффициент Пуассона можно найти как

$$E_\Sigma = \frac{9K_\Sigma \cdot G_\Sigma}{3K_\Sigma + G_\Sigma}; \quad \nu_\Sigma = \frac{3K_\Sigma - 2G_\Sigma}{2(3K_\Sigma + G_\Sigma)}. \quad (24)$$

Объемные модули K_Σ , G_Σ , характеризующие физико-механические характеристики композиционного материала, можно представить в виде зависимостей:

$$K_\Sigma = (K_1 K_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 K_1^{1/2} + m_2 K_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 K_2^{1/2} + m_2 K_1^{1/2} s^{1/2}}; \quad (25)$$

$$G_\Sigma = (G_1 G_2)^{1/2} \cdot \frac{m_1 G_1^{1/2} + m_2 G_2^{1/2} s^{1/2}}{m_1 G_2^{1/2} + m_2 G_1^{1/2} s^{1/2}}, \quad (26)$$

где m_1 и m_2 — объемные доли матрицы и наполнителя соответственно ($m_1 + m_2 = 1$, а $s = E_1/E_2$).

Заключение

Представленные в статье зависимости могут быть использованы при инженерных расчетах конструкций из ПКМ, полученных методом намотки. Результаты расчетов отдельных элементов конструкций, выполненных из ПКМ, доказывают необходимость учета особенностей поведения матрицы и ориентации угольного или стекловолокна для корректной оценки параметров, определяющих прочность конструкции и параметры НДС. Армирование несущих конструкций из ПКМ в заданном конструкцией направлении приводит к достаточно существенному возрастанию их несущей способности и способствует массовому внедрению новых материалов в судостроении. Предложенный трехуровневый подход при расчете конструкций из ПКМ является универсальным и может быть использован для расчета других аналогичных изделий и конструкций в судостроительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженов С. Л.* Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян. — М.: Интеллект, 2009. — 352 с.
2. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. под ред. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта, Б. Э. Геллера. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.
3. *Росато Д. В.* Намотка стеклонитью / Д. В. Росато, К. С. Грове. — М.: Машиностроение, 1969. — 310 с.
4. *Белецкий Е. Н.* Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условий эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
5. *Белецкий Е. Н.* Различные уровни моделирования сложных конструкций судовых энергетических установок, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов / Е. Н. Белецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.
6. *Ашкенази Е. К.* Анизотропия конструкционных материалов: справочник / Е. К. Ашкенази, Э. В. Ганов. — Л.: Машиностроение, 1980. — 247 с.
7. *Глухих В. Н.* Плоская задача теории упругости для цилиндрически анизотропного тела / В. Н. Глухих // Известия СПбЛТА. — 1998. — № 6 (164). — С. 141–145.
8. *Глухих В. Н.* Определение постоянных упругости с учетом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре / В. Н. Глухих, В. М. Петров, Н. Ю. Сойту // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.
9. *Петроченков Р. Г.* Композиты на минеральных заполнителях: в 2 т. / Р. Г. Петроченков. — М.: Изд-во МГТУ, 2005. — Т. 2. — 351 с.
10. *Вержбовский Г. Б.* Прогнозирование характеристик композитных материалов на основе свойств составляющих их частей / Г. Б. Вержбовский // Научное обозрение. — 2014. — № 7–3. — С. 909–913.

THE SPECIFICS OF THE CALCULATION OF THE ELEMENTS OF SHAFTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS WITH RESPECT TO THE DIRECTION OF REINFORCEMENT AND PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MATRIX MODIFIERS

The article describes a new three-level approach to modeling and calculation of parameters of stress strain state of structural elements made of composite materials with a pronounced anisotropy of physical and mechanical properties. These constructions from polymeric composite materials in the form of bodies of rotation of the shafts, casings, pressure vessels, etc. find wide application in shipbuilding. Such composite materials have essential advantages in comparison with traditionally used for these purposes, alloys of metals, because they have less weight, are not sensitive to local defects and, most importantly, more durable and individual designs technological. In solving engineering problems it is necessary to accurately estimate the parameters of the stress-strain state (SSS) of structural composite material, and possibilities of their regulation. Each level of calculation corresponds to the definition of dependency: level one General approach assessment of VAT, depending on the main axes, the second level implies taking into account the adhesion characteristics of the matrix and reinforcing fibres, the third level assesses the influence of fillers and modifiers in the matrix. The article presents the results which show that in different planes (0°, 45°, 90°) depending on the conditional axis of symmetry of laying fiber when winding substantially modified constant elasticity, and they may have several extreme values, depending on combinations of values of modules of elasticity and coefficients of transverse deformation. Given the dependencies and some results of the calculations and the resulting plots, e.g. axis "OH" confirming the anisotropy of properties the main physico-mechanical characteristics of the composite material. In General, the proposed theory, after additional experimental studies can be adapted not only to calculate solids of revolution obtained by winding, but also for other designs, for example by pressing.

Keywords: composite materials, modeling, stress analysis, body rotation, carbon fiber, mechanical disruption, boundary conditions, modifier, adhesion, weights.

REFERENCES

1. Bazhenov, S. L., A. A. Berlin, A. A. Kulkov, and V. G. Oshmjn. *Polimernye kompozicionnye materialy. Prochnost i tehnologii*. M.: Intellekt, 2009.
2. Ljubin, Dzh., A. B. Geller, M. M. Gel'mont, and B. Je. Geller, editors. *Spravochnik po kompozicionnym materialam*. Trans. M.: Mashinostroenie, 1988.
3. Rosato, D. V., and K. S. Grove. *Namotka steklonitju*. M.: Mashinostroenie, 1969.
4. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpalchuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 66–73.
5. Beleckij, Evgenij Nikolaevich. "Different levels of modeling of complex structures marine power plants, the individual elements of which made of composite polymer materials." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.
6. Ashkenazi, E. K., and Je. V. Ganov. *Anizotropija konstrukcionnyh materialov*. Spravochnik. L.: Mashinostroenie, 1980.
7. Gluhih, V. N. "Ploskaja zadacha teorii uprugosti dlja cilindricheski anizotropnogo tela." *Izvestija SPbLTA* 6(164) (1998): 141–145.
8. Gluhih, Vladimir Nikolaevich, Vladimir Markovich Petrov, and Natalja Jurevna Sojtu. "Determination of elasticity constants with anisotropy of properties of composite materials used for winding the responsible shell and beam structures in shipbuilding and port infrastructure." *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.
9. Petrochenkov, R. G. *Kompozity na mineralnyh zapolniteljah*. M.: Izd-vo moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. Vol. 2.
10. Verzhbovsky, Gennadiy Bernardovich. "Forecasting the characteristics of composite materials based on the properties of their components." *Science Review* 7-3 (2014): 909–913.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белецкий Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, главный технолог.
ОАО «Концерн «НПО» Аврора»
famalien@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Beleckij Evgenij Nikolaevich —
PhD, chief technologist.
Concern Avrora Scientific and Production Association JSC
famalien@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-120-129
УДК 620.178

**В. М. Петров,
А. А. Буцанец,
С. Н. Безпальчук**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПАРЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИК – ТИТАН

В современном судостроении при изготовлении судовой запорной арматуры находят широкое применение новые материалы. Среди конструкционных металлических сплавов это сплавы титана, а среди композитных материалов триботехнического назначения широко используются керамика и углепластики. Сочетание этих материалов в нагруженных парах трения объясняется спецификой перекачиваемых жидких сред через элементы судовой запорной арматуры. Высокая агрессивность и температурный фактор играют решающую роль при выборе материалов. Контактующие поверхности деталей пар трения после механической обработки резанием лезвийным или абразивным режущими инструментами, сразу не

могут обеспечить надежной работы сопряжения без заедания или заклинивания. Это в первую очередь объясняется плохими триботехническими характеристиками титанового сплава. На предприятиях судостроительной отрасли применяют сравнительно дорогие и энергозатратные методы поверхностного упрочнения, связанные с ионной имплантацией примесных атомов металла, обладающих повышенной твердостью по отношению к титановому сплаву, либо используют технологические операции пластического деформирования, создающего наклеп поверхности. Сейчас появились методы лазерного упрочнения поверхности в сочетании с нанесением регулярного микрорельефа. Данным исследованиям с точки зрения повышения триботехнических свойств поверхности титановых образцов трения и посвящена предложенная статья. В статье достаточно подробно изложены основные моменты, касающиеся технологии подготовки образцов и ответных контртел, технологии нанесения регулярного микрорельефа с помощью лазера, расписана методика и режимы триботехнических испытаний и методов инструментальной оценки износа и показателей поверхностного слоя образцов трения. Полученные результаты исследований являются новыми и уточняют отдельные постулаты общей теории трения и износа относительно пары: композиционный материал (углепластик) – титановый сплав.

Ключевые слова: титановый сплав, триботехника, антифрикционный углепластик, стенды трения, параметры качества, шероховатость, регулярный микрорельеф.

Введение

Перспективными антифрикционными материалами, созданными специально для работающих в воде нагруженных подшипников скольжения, являются композитные прессовочные материалы, армированные угольными волокнами. Эти материалы обладают хорошими эксплуатационными свойствами и стабильностью геометрических размеров даже при длительном пребывании в воде и агрессивных средах. В современном судостроении, в зависимости от условий эксплуатации, широко применяют антифрикционные углепластики марок ФУТ (фенольная матрица) и УГЭТ (эпоксидная матрица) ФГУП «ЦНИИКМ “Прометей”» [1], [2]. В рамках данной статьи представлены результаты исследований углепластиков марки УГЭТ (углепластики с эпоксидной матрицей), которые эксплуатируются в условиях граничного трения при контактных давлениях до 50 МПа, скорости скольжения 0,005 – 0,5 м/с по контртелам из коррозионно-стойкой стали или титановым сплавам. Учитывая низкие скорости скольжения и высокие удельные нагрузки, можно использовать значительные преимущества эпоксидной матрицы по отношению к фенольной. Так, в частности, углепластики на эпоксидной связующей при гарантированной подаче смазывающей жидкой среды в зону трения обладают более высокой прочностью, ударостойкостью, а также незначительными внутренними напряжениями (в 2 – 3 раза ниже, чем у фенольных). Заготовки из УГЭТ могут быть изготовлены методом горячего прессования с последующей многоступенчатой механической обработкой на высокоэффективном металлообрабатывающем оборудовании — станках с числовым программным управлением и станках типа «обрабатывающий центр» [3].

Объектом исследования являются пары трения скольжения судовой запорной арматуры: композиционный углепластик УГЭТ – титановый сплав 3М. Углепластик УГЭТ изготовлен в соответствии с ТУ 5.966-11704-99, химический состав сплава 3М по ОСТ 1-92077-91.

Исходной информацией, необходимой для исследования, послужил тот факт, что титановый сплав без дополнительной поверхностной упрочняющей обработки обладает плохими антифрикционными свойствами. Более того, микротвердость поверхности трения приработанного образца из УГЭТ соизмерима с микротвердостью полированного образца из титанового сплава 3М и в пересчете на твердость этого же сплава составляет 200 – 220 НВ. Такое значение получено в результате собственных исследований оценки микротвердости и твердости углепластика УГЭТ и титанового сплава 3М на измерительно-вычислительном комплексе «Микрот» по диаграмме вдавливания алмазного индентора в поверхность образца (см. микрофотографию отпечатка УГЭТ на рис. 1) [4], [5]. При сопоставлении твердостей контактирующих поверхностей углепластик УГЭТ – титановый сплав 3М получается, что обе контактирующие поверхности имеют практически равнозначные твердости, поэтому без дополнительного упрочнения или модификации поверхности образца из титанового сплава эффективной работы трибосопряжения достичь нельзя. Изменить поверхностную

твердость образца из титанового сплава 3М можно путем ионной имплантации [6], механического наклепа методом нанесения регулярного микрорельефа по методике, изложенной в работах [7], [8]. Ниже представлен альтернативный метод нанесения регулярного «микрорельефа» методом зонного лазерного легирования поверхности образца из титанового сплава 3М.

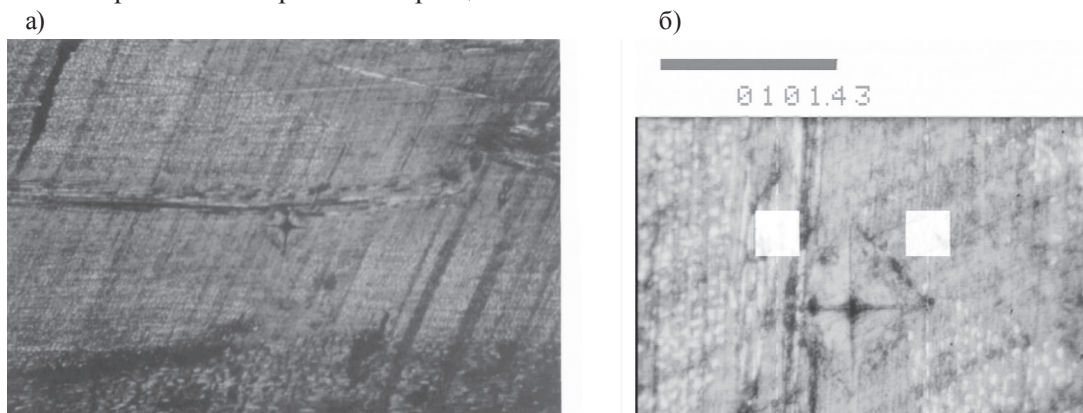


Рис. 1. Микрофотографии углепластика УГЭТ:

- а* — характерная поверхность вдоль следов трения (МБС 10, увеличение $\times 60$);
б — микрофотография отпечатка после вдавливания индентора в поверхность углепластика при нагрузке 0,5 Н, время выдержки под нагрузкой 30 с, шероховатость поверхности $Ra = 0,32$ мкм (измерительно-вычислительный комплекс «МИКРОТ», увеличение $\times 200$)

Цель исследования и постановка эксперимента

Объектом научного исследования являются образцы в форме роликов из титанового сплава 3М с нанесенным регулярным микрорельефом, работающие в паре трения с композитным углепластиком УГЭТ с применением технологической среды, имитирующей морскую воду.

Целью исследования является изучение влияния регулярного микрорельефа, нанесенного с помощью лазерной установки «Минимаркер» на функциональную способность поверхности роликов, выполненных из титанового сплава 3М. Данный сплав является перспективным конструкционным материалом для изготовления подвижных элементов ответственной запорной судовой арматуры.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Изготовлены образцы в виде роликов из титанового сплава 3М, имитирующих поверхность поворотного запорного устройства (рис. 2, *а*).
2. Изготовлены контробразцы в виде секторов-колец (контртел) из композитного углепластика УГЭТ, имитирующих контактную поверхность уплотнительного кольца в шаровом кране (рис. 2, *б*).

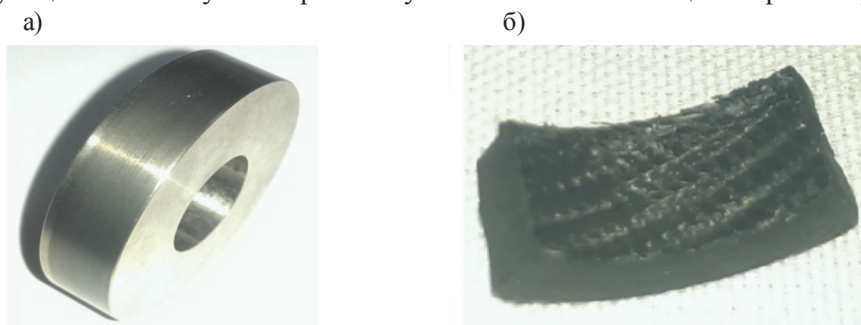


Рис. 2. Поверхность ролика без нанесенного микрорельефа после токарной механической обработки резцом диаметром 40×10 мм (*а*); сектор-колодочка из углепластика УГЭТ (образец с внутренним диаметром 40×15 мм) (*б*)

3. Разработана методика нанесения микрорельефа на образцы-ролики с дискретным шагом: 1×45 ; $1,25 \times 45$; $1,5 \times 45$ на лазерной установке «Минимаркер» (рис. 3, *а*). Для нанесения микрорельефа на поверхность роликов использовалась лазерная установка «Минимаркер» с программой Laser script editor (рис. 3, *б*). В соответствии с разработанной методикой на трех роликах был нанесен рельеф с дискретным шагом (образец № 2 — шаг 1×45 , образец № 3 — шаг $1,25 \times 45$,

образец № 4 — шаг $1,5 \times 45$). Базовый ролик № 1 с постоянными параметрами: частота — 99 кГц, скорость — 10 мм/с, мощность — 100 %, диаметр ролика — 40 мм, ширина ролика — 10 мм.

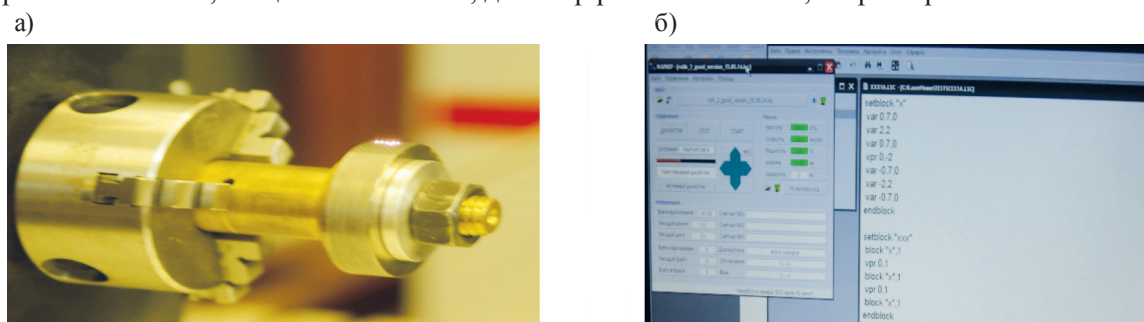


Рис. 3. Нанесение микрорельефа лазерным лучом (а), экран элемента программного продукта Laser script editor (б)

4. Подготовлена технологическая среда для проведения триботехнических испытаний согласно методике испытания запорной судовой арматуры — по данным заказчика. В качестве технологической среды для подачи в зону трения был использован концентрированный раствор хлорида натрия, имитирующий морскую воду (содержание соли NaCl 34 – 35 %).

5. Разработана методика триботехнических испытаний. Для исследования на машине СМЦ-2 были использованы образцы роликов из титанового сплава 3М с различным микрорельефом и разработана методика испытаний на задиристость. В основу методики положены представления о задиристости как свойстве трущихся пар материалов сопротивляться возникновению задигов, т. е. «повреждению поверхностей трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения», которые возникают вследствие схватывания и заедания поверхностей трения. Методика разработана с учётом публикаций [9], [10], а также работ, выполненных различными авторами. Сущность методики состоит в испытании двух образцов при ступенчатом повышении нагрузки, один из которых имеет постоянную площадь трения и находится в постоянном контакте со вторым вращающимся образцом. В качестве показателя, характеризующего задиристость используется давление $P_{уд}^{кр}$ на образцы, которое при испытании приводит к скачкообразному повышению момента трения $M_{тр}$ и коэффициента трения f . Методика предназначена для оценки задиристости в условиях граничной смазки антифрикционных материалов, применяемых для изготовления запорной арматуры, в том числе запорного шара и композитных материалов, а также для оценки влияния на задиристость различных технологических сред. В основу исследования входило сравнение задиристости при различном микрорельефе.

6. Произведена прикатка пар образцов для триботехнических испытаний на стенде трения (рис. 4, а, б).

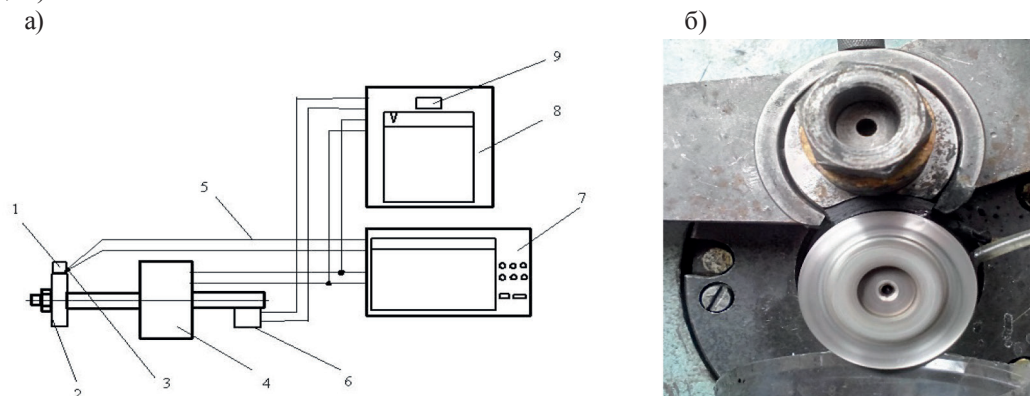


Рис. 4. Структурная схема испытаний и схема рабочего сигнала (а);

исследование образцов с подводом технологической среды в зону трения (б)

Условные обозначения: 1 — образец «сектор»; 2 — образец «ролик»; 3 — термopapa; 4 — датчик момента;

5 — соединительные провода; 6 — датчик измерения числа циклов работы; 7 — осциллограф;

8 — потенциометр-мометоизмеритель; 9 — счетчик числа циклов

7. Проведена инструментальная оценка контактирующих поверхностей трения.

Для исследования шероховатости поверхности использован измерительно-вычислительный комплекс «Профиль» в режиме профилографа-профилометра для оценки параметров микрогеометрии [4], [5], а также непараметрических характеристик по стандарту DIN 4776. С помощью измерения параметров шероховатости были выявлены соответствия шероховатости роликов и поворотного элемента запорного крана судовой арматуры. Отдельные протоколы результатов измерения микрогеометрии представлены в виде профилограмм и кривых АББОТА по стандарту DIN 4776 на основании методики, изложенной в работе [4] (рис. 5).

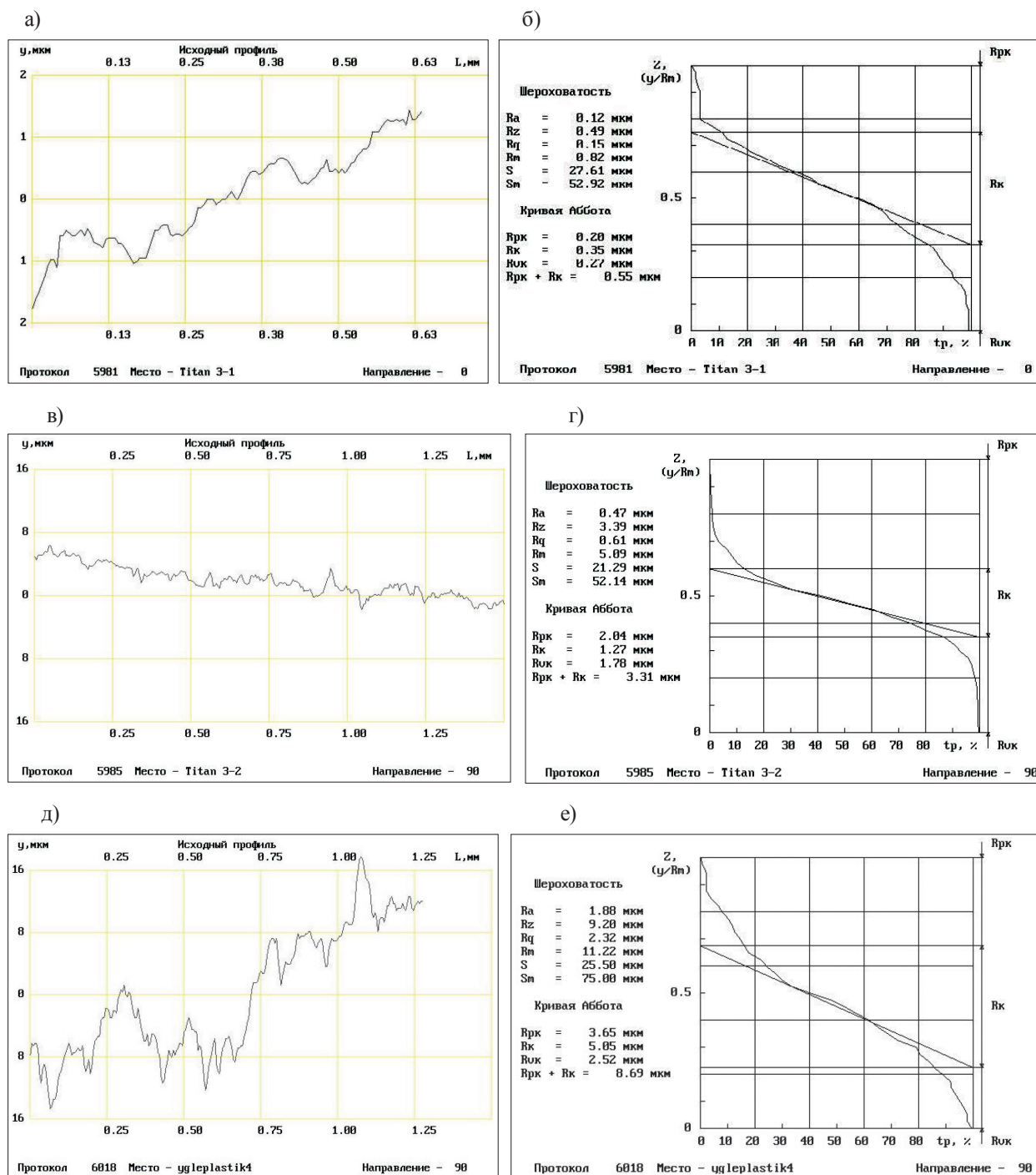


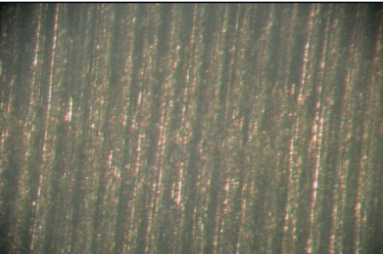
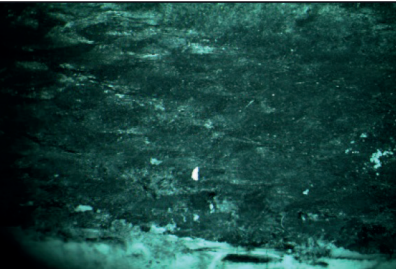
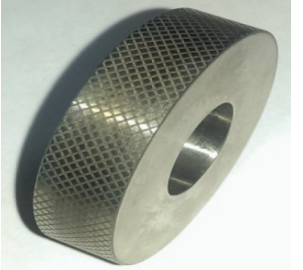
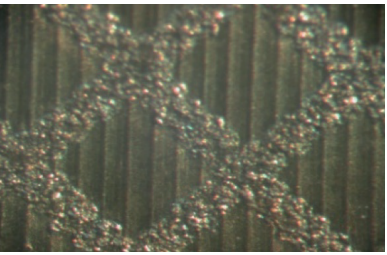
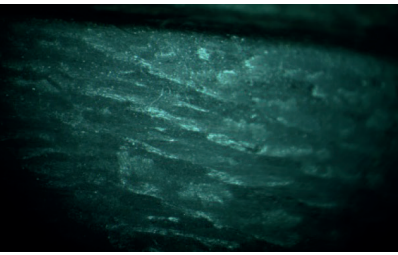
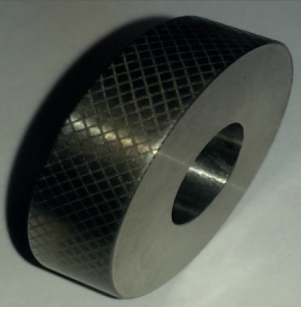
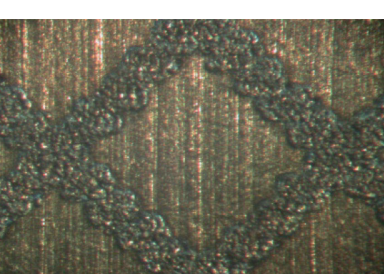
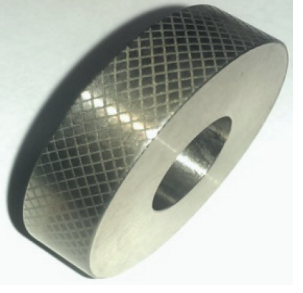
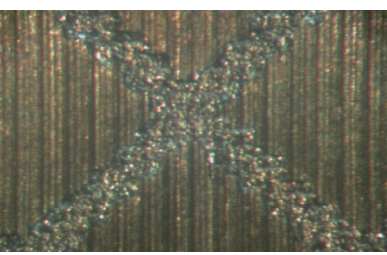
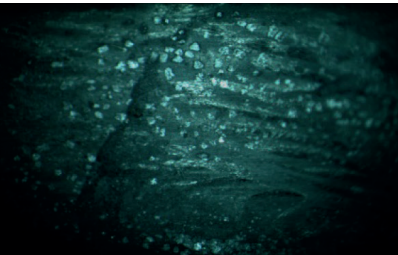
Рис. 5. Примеры профилограмм роликов и колодочек вдоль и поперек следов обработки:

- а — пример профилограммы роликов вдоль следов обработки; б — кривая АББОТА, стандарт DIN 4776;
в — пример профилограммы роликов поперек следов обработки; г — кривая АББОТА, стандарт DIN 4776;
д — пример профилограммы-колодочки УГЭТ поперек следов обработки;
е — кривая АББОТА, стандарт DIN 4776

Визуальный мониторинг поверхностей трения проводился на измерительно-вычислительном комплексе на базе оптического микроскопа МБС-10 с фотоадаптером TV-A и телевизионной приставкой — цифровая USB видеокамера Altami USB 3150R6 1/2CMOS. Обработка сигнала осуществлялась с помощью программы Altami studio для изучения микрорельефа и визуализации дефектов. Примеры микрофотографий поверхностей приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты визуального мониторинга поверхностей трения роликов
из 3М и колодочек из УГЭТ**

№ п/п.	Фотография ролика	Микрофотография поверхности трения ролика титанового сплава 3М (цифровой зум $\times 100$)	Микрофотография поверхности трения контртела из композиционного углепластика УГЭТ (цифровой зум $\times 100$)
1			
2			
3			
4			

8. Представлены протоколы результатов испытаний согласно методике обработки данных в инженерных испытаниях и расчетах (РТМ-44-62). В табл. 2 приведены результаты триботехнических испытаний трибопар титановый сплав 3М – композитный углепластик УГЭТ. Результаты износа композитного углепластика приведены на диаграмме (рис. 6). Из представленных в табл. 2

графиков и диаграммы видно, что только образец без нанесенного рельефа выдержал предельную нагрузку, с критической нагрузкой задир произошел на 41 мин. Ролик с шагом 1×45 проработал 7,5 мин с нагрузкой в 30 кг, ролик с шагом $1,25 \times 45$ — 14 мин с нагрузкой 60 кг, ролик с шагом $1,5 \times 45$ — 8,6 мин с нагрузкой 30 кг.

Таблица 2

Зависимость момента трения от продолжительности испытаний на задир при ступенчатой нагрузке для трибопары титановый сплав 3М – УГЭТ на машине трения СМЦ-2

№ п/п.	График зависимости момента трения от продолжительности испытаний на задир	Объединенные характеристики испытаний
1		Масса ролика — 47,27 г Износ ролика — 0 г Масса колодки — 1,72 г Износ колодки — 0,04 г Момент трения — 120, кг · см Коэффициент трения — 0,027
2		Масса ролика — 47,23 г Износ ролика — 0 г Масса колодки — 1,74 г Износ колодки — 0,86 г Момент трения — 80 кг · см Коэффициент трения — 0,066
3		Масса ролика — 47,4 г Износ ролика — 0 г Масса колодки — 1,7 г Износ колодки — 0,94 г Момент трения — 70 кг · см Коэффициент трения — 0,029
4		Масса ролика — 47,15 г Износ ролика — 0 г Масса колодки — 1,64 г Износ колодки — 1,05 г Момент трения — 80 кг · см Коэффициент трения — 0,066

Примечание. По оси абсцисс отложено время испытаний (с); по оси ординат отложен момент трения (кг · см)

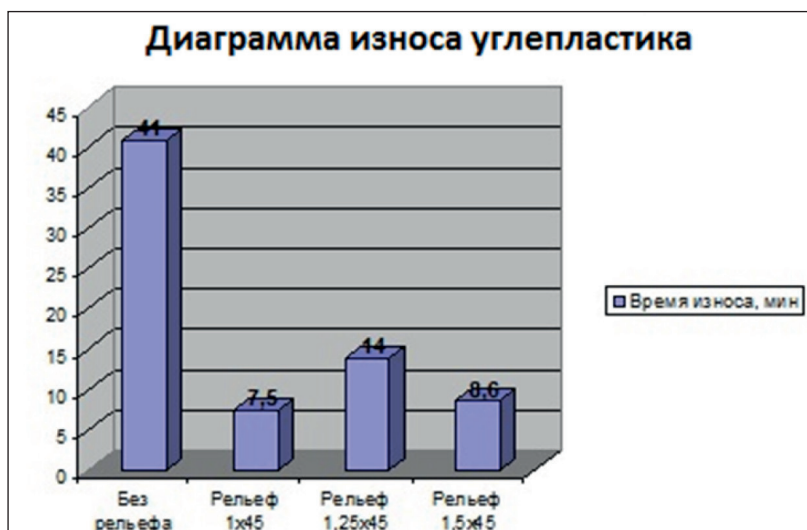


Рис. 6. Диаграмма, характеризующая износ углепластика в зависимости от характера нанесенного регулярного микрорельефа

Выводы

1. Триботехнические испытания, проведенные на машине трения СМЦ-2, показали, что только отсутствие микрорельефа позволяет снизить коэффициент трения для трибопар из антифрикционных материалов, повысить износостойкость и индексы задира.

2. Данный отрицательный результат, полученный на машине трения, показывает, что нанесение регулярного микрорельефа методом лазерного легирования не позволяет повысить износостойкость ответственного трибосопряжения.

3. В результате трибоиспытаний было выявлено, что нанесённый микрорельеф выступает как режущий инструмент (микроабразив — совокупность микронеровностей, расположенных регулярным образом). Воздействие лазерного луча на поверхность титановых образцов привели к изменению структуры поверхности, что видно на характерных микрофотографиях. Возможно, повышению твердости, что требует дополнительных металлографических исследований.

4. Данный метод повышения износостойкости и антизадирных свойств деталей, выполненных из титанового сплава ЗМ и композиционного углепластика УГЭТ, в настоящее время не может быть применим в качестве замены существующего на производстве метода ионной имплантации (насыщения азотом для создания соединения нитрида титана).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахарева В. Е. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения / В. Е. Бахарева, Г. И. Николаев, А. В. Анисимов // Вопросы материаловедения. — 2011. — № 1 (65). — С. 75–88.
2. Бахарева В. Е. Антифрикционные углепластики в узлах трения центробежных насосов / В. Е. Бахарева, А. В. Анисимов, И. В. Лишевич // Насосы. Турбины. Системы. — 2011. — № 1. — С. 47–52.
3. Лишевич И. В. Создание антифрикционных теплостойких углепластиков для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.16.09 — материаловедение (машиностроение) / И. В. Лишевич. — СПб.: ФГУП ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», 2015. — 157 с.
4. Васильков Д. В. Приборы и комплексы контроля качества машин / Д. В. Васильков, В. А. Валетов, В. М. Петров [и др.]; под ред. К. П. Галасовой. — СПб.: АО НПЦ КОНТАКТ, 1995. — 18 с.
5. Васильков Д. В. Комплексные исследования состояния поверхностного слоя ответственных деталей машинных агрегатов / Д. В. Васильков, В. М. Петров, С. Ю. Иванов, В. И. Прима // Тяжелое машиностроение. — 1998. — № 3. — С. 31–34.

6. Васильков Д. В. Комплексное исследование состояния поверхностного слоя инструментальных материалов при ионно-вакуумной обработке / Д. В. Васильков, В. М. Петров, И. А. Сенчило // Управление качеством финишных методов обработки: сб. науч. тр. — Пермь: ПГТУ, 1996. — С. 176–179.

7. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. — 247 с.

8. Пат. 2252131 Российская Федерация, МПК В 24 С 1/00. Способ формообразования регулярного микрорельефа / М. Г. Исупов; заяв. и патентообл. Исупов Максим Георгиевич. — № 2002133176/02; заявл. 09.12.2002; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14.

9. Буше Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. — М.: Наука, 1981. — 128 с.

10. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. — М.: Стандартиформ, 2005. — 20 с.

INFLUENCE OF LASER HARDENING TECHNOLOGY OF SURFACE OF SAMPLES OF TITANIUM ALLOY ON THE PERFORMANCE OF FRICTION PAIRS CARBON FIBER – TITANIUM

Abstract, modern shipbuilding in the manufacture of marine valves find wide application of new materials. Among structural metallic alloys are alloys of titanium, and among composite materials, ceramic and carbon fiber reinforced plastics tribological purposes. The combination of these materials in loaded friction pairs, due to the specifics of the pumped liquid medium through the elements of shipboard valves. High aggressiveness and the temperature factor plays a crucial role in the choice of materials. Contact surfaces of parts of friction pairs, after mechanical, once can not provide reliable operation of the pairing without binding or jamming. This is primarily due to bad tribological characteristics of titanium alloy. In practice, often use expensive methods of surface hardening: either related to ion implantation of impurity atoms of the metal having an increased hardness relative to the titanium alloy, or use of technological operations of plastic deformation that creates the hardening of the surface. Now there are techniques of laser surface hardening in combination with the application of the regular microrelief. These studies from the point of view of improving the tribological properties of the surface of titanium samples and on the proposed friction article.

In particular, the article described in some detail the main points concerning the technology of sample preparation and counter-counter – tel, the technology application of the regular microrelief with a laser, painted technique and modes of tribological tests and methods of instrumental evaluation of wear and parameters of surface layer of samples of friction. The result of research is new and clarifies individual postulates of the General theory of friction and wear a pair of composite material (CFRP) and titanium alloy.

Keywords: titanium alloy, tribology, antifriction carbon plastic, friction stands, quality parameters, roughness, regular microrelief.

REFERENCES

1. Bakhareva, V. E., G. I. Nikolaev, and A. V. Anisimov. "Antifrictional nonmetallic materials for units of a sliding friction." *Voprosy Materialovedeniya* 1(65) (2011): 75–88.

2. Bakhareva, V. E., A. V. Anisimov, and I. V. Lischevich. "Antifrictional carbon plastics in the centrifugal pumps friction assemblies." *Nasosy. Turbiny. Sistemy* 1 (2011): 47–52.

3. Lishevich, I. V. Sozдание antifrikcionnyh teplostojkih ugleplastikov dlja vysokoskorostnyh podshipnikov nasosov i parovyh turbin. PhD diss. SPb.: FGUP "CNII konstrukcionnyh materialov "Prometej", 2015.

4. Vasilkov, D. V., V. A. Valetov, V. M. Petrov, et al. *Pribory i komplekсы kontrolja kachestva mashin*. Edited by K. P. Galasova. SPb.: AO NPC KONTAKT, 1995.

5. Vasil'kov, D. V., V. M. Petrov, S. Yu. Ivanov, and V. I. Prima. "Complex investigation of the state of the surface layer of vital components in machine units." *Tjazheloe mashinostroenie* 3 (1998): 31–34.

6. Vasilkov, D. V., V. M. Petrov, and I. A. Senchilo. "Kompleksnoe issledovanie sostojanija poverhnostnogo sloja instrumentalnyh materialov pri ionno-vakuumnoj obrabotke." *Upravlenie kachestvom finisnyh metodov obrabotki: sb. nauch. tr.* Perm: PGU, 1996: 176–179.

7. Shnejder, Ju. G. *Jekspluatacionnye svojstva detalej s reguljarnym mikrorel'efom*. 2-d ed. L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1982.

8. Isupov, M. G. RU 2 252 131 C2, IPC B 24 C 1/00. Sposob formoobrazovanija reguljarnogo mikrorel'efa. Russian Federation, assignee. Publ. 20 May 2005.

9. Bushe, N. A., and V. V. Kopytko. *Sovmestimost trushhihsja poverhnostej*. M.: Nauka, 1981.

10. Russian Federation. State Standart 23.224-86. Products wear resistance assurance. Reestablished machine parts. Experimental evaluation of wear resistance ability. M.: Standartinform, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Маркович —
доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
tribotex@narod.ru
Буцанец Артем Александрович —
начальник отдела НТИ и ИС.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
govorlivii@gmail.com
Безпальчук Сергей Николаевич — соискатель.
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
ualaes@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Vladimir Markovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
tribotex@narod.ru
Butsanets Artem Aleksandrovich —
Head of Department of Scientific and Technical
Information and Intellectual Property
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
govorlivii@gmail.com
Bezpal'chuk Sergej Nikolaevich — applicant.
Peter the Great St.Petersburg
Polytechnic University
ualaes@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-129-139

УДК 629.12, 697.9

К. А. Васильев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА УЧАСТКАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье приведен алгоритм, методология определения и расчета элементов системы вентиляции и кондиционирования с быстропеременным расходом воздуха на примере одной зоны производственного помещения — участка механической обработки заготовок из композиционных полимерных материалов, применяемых в современном судостроении. При обработке композиционных полимерных материалов выделяется большое количество вредных примесей, существенно меняется газовый состав в рабочей зоне, увеличивается риск выброса в окружающую среду вредных примесей от разрушения матрицы и армирующих волокон, поэтому достаточно актуальными являются исследования, посвященные вопросам защиты оператора и зоны промышленного помещений предприятий судостроительной отрасли от вредных выбросов, а также общему давлению на окружающую среду и снижению класса опасности производства.

Представленные технические решения, которые могут быть использованы на этапе проектирования, на базе современных комплектовующих предполагают выполнение заданных требований по штатной эксплуатации системы приточной вентиляции и кондиционирования рабочей зоны. Предлагается методологическое решение, соответствующее заданным требованиям технических норм подобных объектов эксплуатации. С целью повышения точности, быстродействия и энергоэффективности синтезирована система, объединяющая собственно вентиляцию, кондиционирование и количественное регулирование приточного воздуха, в том числе по процентному составу CO_2 . Приведен пример расчета вентиляционных параметров устройства и создана математическая модель объекта по газовой среде. Произведен анализ работы предложенной системы в программном пакете Matlab. Полученные в виде графиков и диаграмм результаты достаточно наглядно иллюстрируют протекающие переходные процессы вентиляции и кондиционирования воздуха на всех этапах и точно учитывают малейшие изменения газового состава и состава пылевоздушной смеси, образующейся в рабочей зоне у каждого обрабатываемого центра.

Ключевые слова: композит, углепластик, реактопласт, механическая обработка, производственный участок, вентиляция, кондиционирование, вредные факторы, моделирование, алгоритм, система управления.

Введение

При производстве современных судов различного типа и назначения широко используются новые композиционные полимерные материалы (КПМ) с разными видами матрицы (фенольные, эпоксидные или полимерные связующие) и армирующих элементов в каркасе (стекловолокно, угольное волокно и т. д.) [1] – [4].

В производственных помещениях механической обработки заготовок из КПМ существует множество факторов, которые вызывает быстрое изменение параметров воздушной среды [4] – [6]. Стандартные методики и центральные системы вентиляции и кондиционирования воздуха в силу ряда причин не способны обеспечить стабильность параметров воздуха в условиях повышенной запыленности, загазованности, агрессивности частиц пыли и продуктов деструкции композита в результате разрушения материала при механической обработке КПМ [4] – [6]. Поэтому актуальными являются научные исследования, посвященные вопросам автоматизации приточно-вытяжной вентиляции помещения с быстропеременным расходом воздуха, а также вредным выбросам, образующимся в процессе механической обработки КПМ. В соответствии с поставленной целью необходимо разработать алгоритм последовательного решения следующих задач:

- установить необходимые параметры воздуха в производственном помещении на участке механической обработки заготовок на современном оборудовании из композиционных полимерных материалов судостроительной отрасли — особенно по составу газовой среды и CO_2 в частности;
- сформулировать требования к приточно-вытяжной вентиляции и системе кондиционирования производственных помещений;
- разработать алгоритм работы системы приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования;
- провести математическое моделирование и расчеты отдельных элементов с использованием пакета прикладных программ.

Объект исследования

Объектом исследования является зона производственного цеха площадью 100 м^2 , в которой располагаются четыре станка типа «Обрабатывающий центр LEADWELL T7» (рис. 1). Предметом исследования является система автоматического управления (САУ) кондиционирования воздуха, работающая в оптимальном режиме. Практическая значимость исследования заключается в разработке САУ, обеспечивающей оптимальные параметры воздуха в помещении. Нормативной базой являются документы ГОСТ, СНиП, СанПин [7].

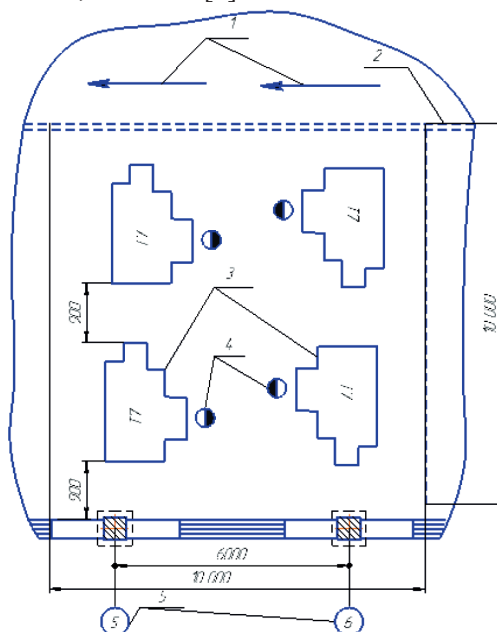


Рис. 1. План производственного участка механической обработки заготовок из композиционных материалов на токарных обрабатывающих центрах с числовым программным управлением LEADWELL T7:

- 1 — направление транспортных потоков по проходу; 2 — перегородка; 3 — станки T7;
4 — рабочее место оператора

Далее представлен алгоритм, разработанная математическая модель помещения и системы кондиционирования воздуха.

Исходные данные для исследования

Качество воздуха в производственном помещении определяется согласно ГОСТ 30494-2011 [8]. Необходимый воздухообмен в помещении может быть определен двумя способами: на основе удельных норм воздухообмена и на основе расчета воздухообмена, необходимого для обеспечения допустимых концентраций загрязняющих веществ. Конечно, система вентиляции может работать «на максимум» так, чтобы гарантировать нормальный уровень CO_2 (согласно действующим стандартам, до 2000 мг/м^3) и других вредных выделений, но такое решение проблемы качества воздуха является неэнергоэффективным.

Действительно, если в зоне помещения площадью 100 м^2 находятся пять человек, выполняющих легкую работу, то выделения CO_2 , согласно CEN CR 1752, составят

$$\text{CO}_{2\text{л}} = 50000 \cdot 5 = 250000 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \quad (1)$$

и для средней интенсивности

$$\text{CO}_{2\text{с}} = 100000 \cdot 5 = 500000 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}. \quad (2)$$

Минимальный воздухообмен в помещении рассчитывается по формуле

$$L = \frac{m_{\text{po}}}{q_{\text{оз}} - q_n}, \quad (3)$$

где $q_{\text{оз}}$ — уровень вредных выделений в помещении; m_{po} — поступление вредных веществ в помещение; q_n — уровень вредных веществ в подаваемом воздухе (1000 мг/м^3 для больших городов). Тогда для работы с низкой интенсивностью он составит

$$L_{\text{н}} = \frac{250000}{2000 - 1000} = 250 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

и при средней интенсивности

$$L_{\text{с}} = \frac{500000}{2000 - 1000} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (5)$$

В процессе механической обработки резанием КПМ появляется ряд факторов, которые вызывают быстрое загрязнение воздуха непосредственно в рабочей зоне станка и в помещении механического участка. К подобным вредным выделениям можно отнести: паровыделения и газовыделения, пылевыведения, дымовыведения (аэрозоли), мельчайшие твердые частицы, свободно витающие в воздухе, тумановыведения — образование в воздухе мельчайших частиц той или иной жидкости (например, смазочно-охлаждающие жидкости с ультрадисперсной стружкой КПМ). Поэтому целью данной работы является разработка таких элементов системы общеобменной вентиляции, которые обеспечили бы требуемую температуру и качество воздуха в отдельных зонах (помещениях), затрачивая на достижение этой задачи минимальное количество энергии.

В данной статье рассмотрена именно общеобменная система вентиляции, а не укрытия и местные отсосы, так как они достаточно хорошо изучены и автоматизированы и представляют собой отдельный класс вентиляционных систем.

Моделирование исследуемого объекта и проверочный расчет

Для обеспечения требуемых оптимальных условий в обслуживаемой зоне (помещении) подается смесь приточного и рециркуляционного воздуха. В процессе смешения подаваемый воздух ассимилирует избыточное тепло, влагу и другие вредности. С точки зрения математического моделирования, синтез модели помещения представляет собой непростую задачу, так как параметры воздуха в помещении неоднородны. Рассредоточение вредностей в помещении определяется

фундаментальными уравнениями движения потока (непрерывности, энергии, переноса для распределения загрязнений) и тремя уравнениями количества движения (по высоте, длине и ширине помещения). Для их решения требуется масштабирование по времени. Локальная турбулентность приведена как переменный коэффициент диффузии, или турбулентная вязкость. Турбулентная вязкость определяется по двум уравнениям переноса: диссипации кинетической энергии турбулентности и кинетической энергии турбулентности. Следовательно, для решения поставленной задачи требуется найти корни восьми сдвоенных нелинейных дифференциальных уравнений. Эти уравнения состоят из производных первой и второй степени, выражающих конвекцию, диффузию и источник с переменным потоком загрязняющих веществ.

Дифференциальные уравнения воздухообмена в помещении решить аналитически не представляется возможным, поэтому, с целью упрощения задачи, рассмотрим параметры воздуха в рабочей зоне, т. е. там, где установлены датчики. Обслуживаемую зону (помещение) можно представить как объект, на который оказывают влияние внешние (н) и внутренние (пом) возмущающие воздействия (рис. 2): W — влажность; Q — теплоизбытки; G — газы. Входными параметрами тогда будут: $d_{пр}$, $t_{пр}$ и $G_{пр}$, и соответственно, регулируемые: $t_{пом}$, $d_{пом}$, $G_{пом}$. Как правило, значительно изменяется только температура и качество воздуха, а влажность остается в пределах допустимых значений.

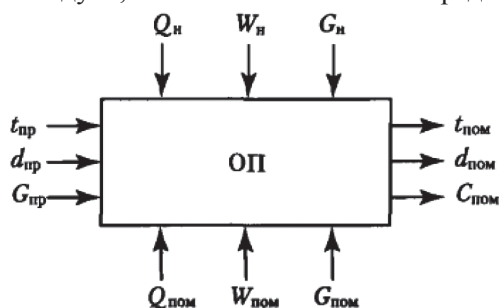


Рис. 2. Обслуживаемая зона помещения

Тогда динамические свойства объекта будут зависеть от коэффициента K_v — кратности воздухообмена (определяется размерами помещения и общей площадью стен), коэффициентов l_v — теплоемкости, $K_{огр}$ — теплопереноса ограждений и $T_{огр}$ — постоянной времени ограждения. Передаточная функция по каналу температуры подаваемого воздуха получена в виде

$$W_{пом}(p) = \frac{(T_{огр}p + 1)K_{пом}}{T_{пом}p + 1}, \quad (6)$$

где $K_{пом}$ и $T_{огр}$ определяются по показателям K_v , l_v , $K_{огр}$, теплопроводности C_v и плотности P_v воздуха; $T_{пом}$ — постоянная времени помещения.

Анализ переходного процесса, проведенный на основании математической модели (рис. 3, кривая 1) и эксперимента (рис. 3, кривая 2), показал, что температура в помещении меняется в два этапа. На этапе *A* температура изменяется быстро, при этом скорость изменения температуры обратно пропорциональна кратности воздухообмена $3 - 4 K_v$. На этапе *B* изменение температуры воздуха существенно замедляется, так как стены помещения обладают большой теплоемкостью.

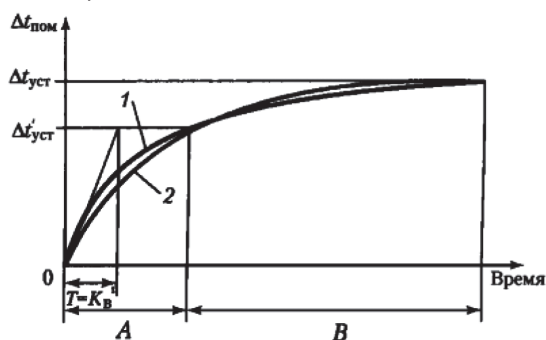


Рис. 3. Переходный процесс параметров воздуха в производственных помещениях, по данным работы [9]

Поэтому инерционностью ограждений можно пренебречь. Входящим воздействием будет Q — тепло, Вт, а выходом — отклонение температуры $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Тогда дифференциальное уравнение для исследуемого помещения

$$V \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}} \frac{d\Delta\epsilon}{dt} = \Delta Q_{\text{пр}} - \Delta T_3, \quad (7)$$

где $\Delta\epsilon$ — отклонение температуры; $\Delta Q_{\text{пр}}$ — тепло приточного воздуха (не зависит от помещения); ΔT_3 — температура зоны (изменяемая величина в течение рабочей смены).

Температура рабочей зоны может быть определена зависимостью $\Delta T_3 = K_{\epsilon} \Delta\epsilon$, где коэффициент K_{ϵ} можно вычислить по формуле

$$K_{\epsilon} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}} \cdot q. \quad (8)$$

Перенесем ΔT_3 в левую часть уравнения (7) и разделим на K_{ϵ} , тогда получим выражение

$$\frac{V \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}}}{K_{\epsilon}} \frac{d\Delta\epsilon}{dt} + \Delta\epsilon = \frac{\Delta Q_{\text{пр}}}{K_{\epsilon}}. \quad (9)$$

Постоянная времени (зависит от типа помещения):

$$T_{\text{пом}} = \frac{V \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}}}{K_{\epsilon}}. \quad (10)$$

Коэффициент усиления (зависит от типа помещения):

$$K_{\text{пом}} = \frac{1}{K_{\epsilon}}. \quad (11)$$

Представим функцию (6) температуры подаваемого воздуха по каналу аperiодическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{пом}}(p) = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}} p + 1}, \quad (12)$$

где коэффициент $K_{\text{пом}}$ и постоянная $T_{\text{пом.Т}}$ находятся из выражений:

$$K_{\text{пом.Т}} = \frac{1}{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}} \cdot q} = \frac{1}{2,49 \cdot 1,2 \cdot 1,025 \cdot 0,24} = 1,36; \quad (13)$$

$$T_{\text{пом}} \sim K_{\text{в}}^{-1} = \frac{V \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}}}{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} p_{\text{в}} \cdot q} = \frac{500}{2,49 \cdot 0,24} = 836 \text{ с}, \quad (14)$$

где $G_{\text{в}}$ — расход воздуха $\text{м}^3/\text{с}$; $c_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воздуха, $\text{КДж}/\text{кг} \cdot \text{с}$; p — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V — объем помещения, м^3 ; q — показатель теплообмена по поверхностям $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ (примем $q = 0,24$).

Процесс изменения качества воздуха в помещении также представим аperiодическим звеном первого порядка

$$W_{\text{пом}}(p) = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}} p + 1}. \quad (15)$$

Входящим воздействием будет CO_2 — вредные выделения, $\text{ppm}/\text{с}$, а выходом — отклонение качества воздуха ΔCO_2 ppm . Значение коэффициента $K_{\text{пом}}$ можно определить как отношение входящей величины к выходящей и характеризуется коэффициентами $K_{\text{пом}} = 511/71 = 7,25$ и $T_{\text{пом}} = K_{\text{в}}^{-1} = 200$ (с), которые остаются неизменными.

Действительно, такое упрощение не оказывает значительного влияния на расчет рассредоточенных параметров воздуха в помещении, учитывая быстрое перемещение воздушных масс под действием гравитационных и тепловых воздействий и расположение воздухопритока и воздухозабора в промышленном помещении (рис. 4).

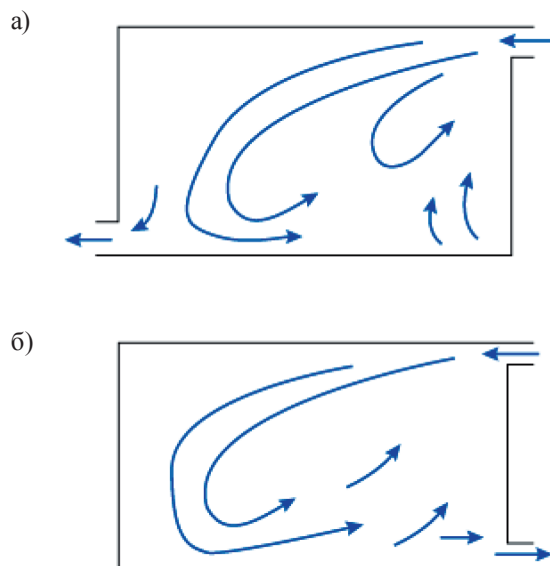


Рис. 4. Схема вентиляции производственного помещения по данным работы [10]:
а — с перекрестными потоками воздуха; б — с круговыми потоками воздуха

Исследуемая система по каналу CO_2

Цель синтеза системы по каналу CO_2 — обеспечить необходимую точность поддержания параметра ppm в помещении (рис. 5). Допустимое отклонение температуры от уставки примем равным $\varepsilon = 10$ (ppm).

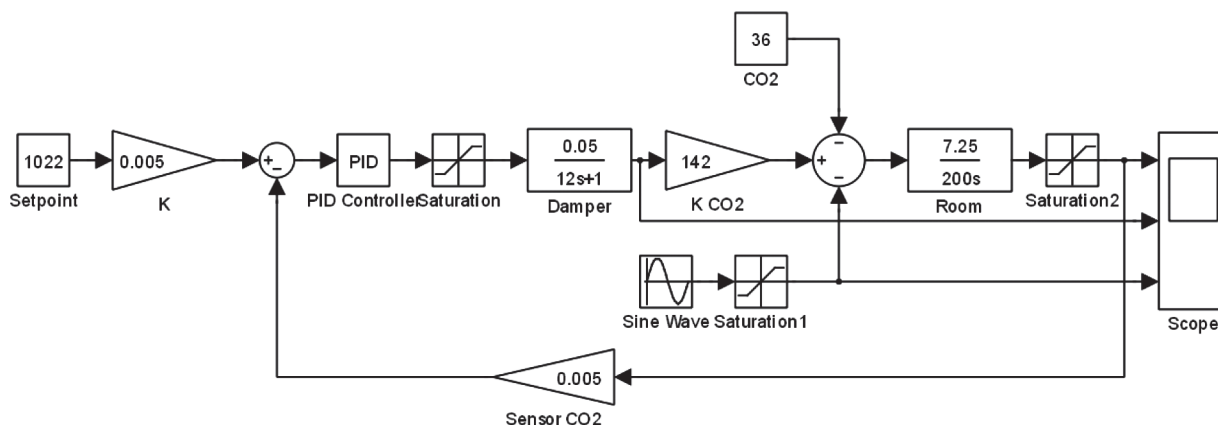


Рис. 5. Функциональная схема системы кондиционирования и вентиляции с учетом современных блоков и комплектующих

Блок Setpoint — уставка требуемого содержания CO_2 в помещении. Согласно СНиП, это значение должно быть не выше 2000 мг/м^3 , что в пересчете в единицы ppm будет равным $S = 2000 \cdot 0,511 = 1022 \text{ ppm}$. Damper — воздушная заслонка. Сигнал с PID-регулятора на заслонку ограничен до $U_{\text{макс}} = 10$ (В) блоком Saturation. Для определения содержания CO_2 в приточном воздухе используется блок $K \text{ CO}_2$, значение которого определяется из отношения максимального потока воздуха через заслонку $G_{\text{пр}}$ к количеству вредных в уличном воздухе. Блоки Room и Integrator представляют собой модель помещения. Производительность вентилятора не влияет на скорость приточного воздуха, поэтому он отсутствует на схеме.

Построим переходный процесс в разомкнутой системе по каналу CO_2 . Время переходного процесса $T_{\text{пн}} = 137 \text{ с}$ (рис. 6).

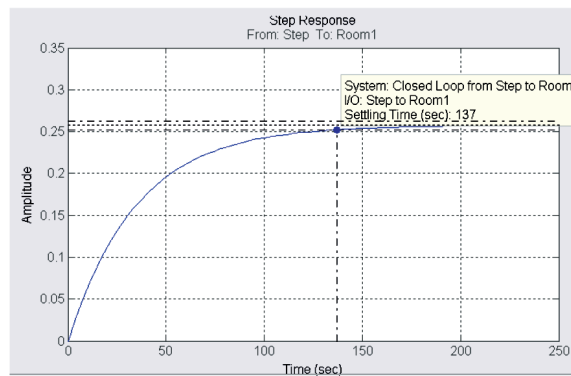


Рис. 6. Диаграмма, характеризующая переходный процесс в разомкнутой системе по каналу CO₂

Построим карту нулей и полюсов замкнутой системы (рис. 7). Всего имеется один полюс: $-0,0286$. Система устойчива.

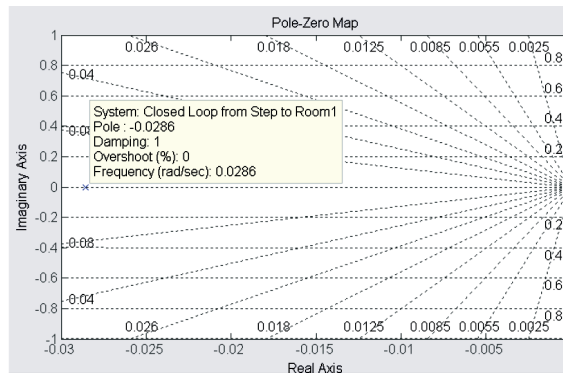


Рис. 7. Карта, характеризующая положение нулей и полюсов

Поскольку система содержит интегрирующее звено (комната — производственное помещение), произведем расчет согласно известным настройкам ПД-регулятора. Дифференциальная составляющая отсутствует, поэтому рассчитаем только пропорциональный коэффициент

$$K(\text{per}) = \frac{T_{\text{ком}}}{K_{\text{засл}} \cdot K_{\text{дат}} \cdot K_{\text{ком}} \cdot a \cdot T_{\text{засл}}} = \frac{200}{0,5 \cdot 0,005 \cdot 7,25 \cdot 4 \cdot 12} = 230. \quad (16)$$

Рассмотрим исходную аналоговую систему как часть цифровой в пакете Matlab (рис. 8).
Transfer function

$$\frac{0,009556z + 0,009477}{z^2 - 1,956z + 0,9753}$$

Sampling time

$$0.3$$

(17)

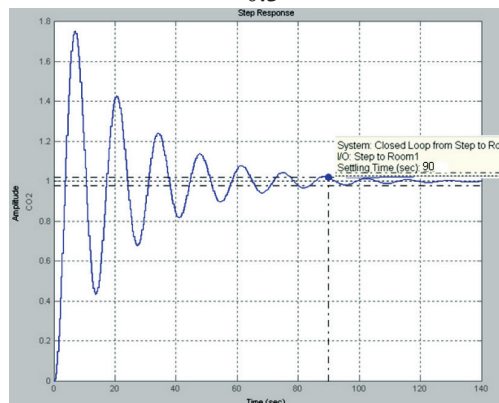


Рис. 8. Вид диаграммы после цифровой обработки

Найдем корни характеристического уравнения замкнутой цифровой системы:

$$A = [1, -1,956, 0,9753]; \gg r = \text{roots}(A);$$

$$r = 0,9780 + 0,1372i; 0,9780 - 0,1372i. \quad (18)$$

Вещественные части комплексных корней меньше единицы. Система устойчива с минимальным запасом устойчивости.

Блоки CO₂ и Sin Wave представляют собой возмущающее воздействие. Согласно расчетам, постоянное поступление CO₂ в производственное помещение можно найти по формуле

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_{2л} \cdot 0,511}{3600} = \frac{250000 \cdot 0,511}{3600} = 36 \frac{\text{ppm}}{\text{с}}. \quad (19)$$

Неравномерное поступление CO₂ при увеличении интенсивности работы можно представить возмущением вида $F(t) = A \sin \omega t$, максимальная амплитуда которого будет равна

$$\text{CO}_2 = \frac{(\text{CO}_{2\text{ср}} - \text{CO}_{2л}) \cdot 0,511}{3600} = \frac{(5 - 2,5)10^5 \cdot 0,511}{3600} = 35 \frac{\text{ppm}}{\text{с}}. \quad (20)$$

Проведем исследования динамики системы, изменяя параметр ω . Результаты исследования сведены в таблицу.

**Влияние периода колебаний возмущающего воздействия
на точность поддержания качества воздуха**

ω , рад/с	0,00001	0,0001	0,001	0,005	0,01	0,0175	0,025	0,5
ε , 0С	1	1,1	1,2	1,4	1,6	2	3	6

Графическое отображение зависимости отклонения CO₂ от уставки (ε) от частоты возмущения (ω) представлено на (рис. 9). Максимальное отклонение $\varepsilon = 6$ (ppm) наблюдается при частоте колебаний менее 2 мин. Очевидно, что колебания такой амплитуды с частотой 2 мин невозможны. Это значит, что система соответствует заданным требованиям (допустимое отклонение $\varepsilon = 10$ (ppm)).

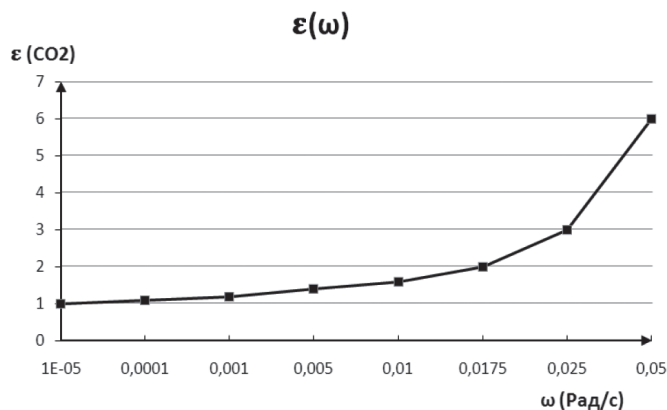


Рис. 9. Отклонение качества воздуха (ppm)

Рассмотрим влияние возмущения (вредных выделений, ppm) на открытие клапана заслонки (Dampер) — рис. 10. Из приведенного графика ясно, что увеличение количества выделений приводит к открытию заслонки. Таким образом, реализуется контроль качества воздуха в помещении, а, значит, уменьшается производительность приточного вентилятора центральной СКВ. Быстро изменяемые параметры воздуха в помещении не влияют на устойчивость системы и точность их регулирования.

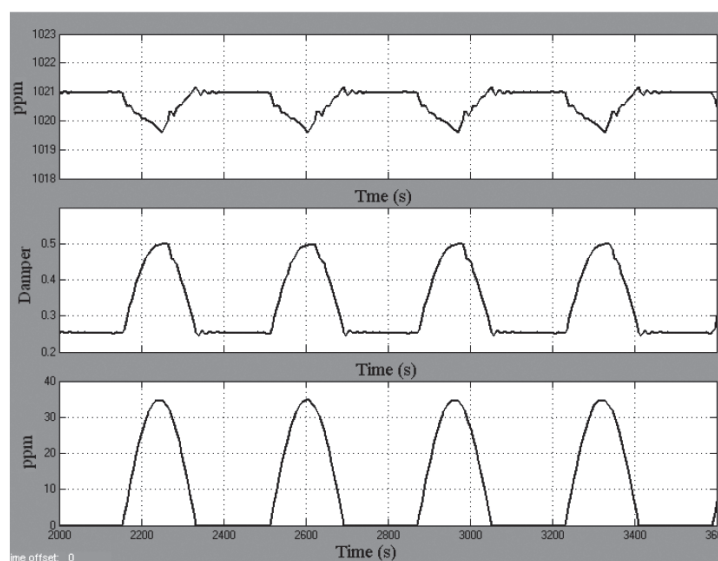


Рис. 10. Влияние возмущения на открытие клапана заслонки (сверху вниз): отклонение (ppm), пропускная способность заслонки (0 – 0,5 м³/с), возмущение (ppm)

Заключение

Стандартные центральные системы кондиционирования воздуха в силу ряда причин, которые рассмотрены в этой статье, не способны обеспечить стабильность параметров воздуха в производственном помещении, поэтому осуществлена попытка разработки алгоритма автоматизация приточно-вытяжной вентиляции помещения с быстропеременным расходом воздуха. При этом решены следующие задачи:

- определены необходимые параметры воздуха в производственном помещении согласно действующим нормам и правилам [7];
- по результатам исследования необходимых параметров воздуха в производственном помещении были сформулированы требования к приточно-вытяжной вентиляции производственных помещений: быстроедействие, точность поддержания параметров воздуха в помещении и экономичность;
- найдено техническое решение, отвечающее заданным требованиям, которое заключается в интеграции вентиляции, кондиционирования (рециркуляции) в единое устройство. Составлена функциональная схема предлагаемого решения, которая подтверждает возможность смешения приточного и рециркуляционного воздуха. Интеграция позволяет синхронизировать работу систем вентиляции и кондиционирования. Как результат — повышается комфорт в обслуживаемом помещении и снижаются затраты на создание нужного микроклимата;

Данные предположения были подтверждены путем исследования синтезированной системы в программном пакете Matlab. Получены следующие результаты: $T_{\text{пп}} = 1220$ с, максимальное отклонение температуры $\varepsilon_T = 0,4$ °C, максимальное отклонение качества воздуха $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 6$ ppm.

При раздельных системах вентиляции и кондиционирования достигнуть таких результатов невозможно, так как скорость воздуха на выходе приточной вентиляции на несколько порядков меньше, чем скорость воздуха на выходе из кондиционера, поэтому процессы воздухообмена в помещении будут зависеть от взаимного размещения средств вентиляции и средств кондиционирования. По мере их удаления друг от друга увеличивается постоянная времени по качеству воздуха, которая будет зависеть от кратности воздухообмена вентиляции (в нашем случае — однократный, т. е. один раз в час). Тогда как интеграция вентиляции и кондиционирования (рециркуляции) способствует значительному повышению точности поддержания качества воздуха, поскольку постоянная времени по качеству воздуха определяется высокой кратностью воздухообмена рециркуляции (10 и более кратный).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булкин В. А. Применение перспективных композиционных материалов в надводном судостроении / В. А. Булкин, Н. Н. Федонюк, А. В. Шляхтенко // Морской вестник. — 2013. — № 1. — С. 7–8.
2. Бальчюнас А. С. Краткий обзор использования композиционных материалов при строительстве кораблей и элементов их конструкций / А. С. Бальчюнас // Научные исследования: от теории к практике. — 2016. — № 1 (7). — С. 146–147.
3. Анисимов А. В. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справ. / А. В. Анисимов, В. Е. Бахарева, И. В. Блышко [и др.]; под общ. ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко. — СПб.: НПО «Профессинал», 2012. — 916 с.
4. Васильев К. А. Повышение эффективности работы системы местной вентиляции при механической обработке композиционных полимерных материалов, применяемых в современном судостроении / К. А. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 64–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-64-74.
5. Волков В. А. Сбережение энергии в системах вентиляции за счет внутренней очистки и перераспределения воздуха / В. А. Волков // VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: тез. докл. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — Т. 3. — С. 50–51.
6. Воскресенский В. Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика: учеб. пособие: в 2 т. / В. Е. Воскресенский. — СПб.: Политехника, 2009. — Т. 2. — Ч. 1. Системы пылеулавливания. — 304 с.
7. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г.). — М.: Минздрав России, 2001. — 20 с.
8. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. — М.: Стандартинформ, 2013. — 12 с.
9. Бондарь Е. С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. — Киев: Аванпост-Прим, 2005. — 560 с.
10. Руководство по проектированию эффективной вентиляции (рабочая версия): пер. с англ. Л. И. Баранова // АВОК. — 2003. — № 3. — С. 20.

SIMULATION OF AIR CONDITIONING SYSTEM IN AREAS OF MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS SHIPBUILDING PRODUCTION

The article presents the algorithm of the methodology and calculation of elements of system of ventilation and air conditioning systems with rapidly varying air flow in one zone of production facilities – phase mechanical machining of composite polymeric materials used in modern shipbuilding. In the processing of polymer materials produces a large amount of harmful impurities significantly changes the gas composition in the working area and increases the risk of emission of harmful impurities from the destruction of the matrix and reinforcing fibers into the environment. Therefore, quite relevant questions of protection of the operator and the area of the industrial premises of the enterprises of the shipbuilding industry from harmful emissions, as well as the overall pressure on the environment and reduce the hazard class of production.

Presented technical solutions at the stage of elaboration and the implementation of algorithms based on modern components assume performance of the specified requirements for normal operation of ventilation systems and conditioning of the working area.

In addition, the article propose a methodological solution matches the requirements of the technical standards of such facilities operation. With the aim of improving the accuracy, speed and efficiency, the integrated system that combines proper ventilation, air conditioning and a quantitative regulation of intake air, including the percentage composition of CO₂. The example of calculation of ventilation parameters of the device and the mathematical model of the object in a gaseous environment. The analysis of the proposed system in the software package Matlab. The results obtained in the form of graphs and charts quite clearly illustrate the occurring transient processes of ventilation and air-conditioning in all stages and tailored exactly to the slightest changes in the gas composition and the composition of the dust-air mixture formed in the working area of each machining center.

Keywords: composite, carbon fiber, thermoset, tooling, the production area ventilation, air-conditioning, hazards, simulation, algorithm, control system.

REFERENCES

1. Bulkin, V. A., N. N. Fedonjuk, and A. V. Shljahtenko. "Primenenie perspektivnyh kompozicionnyh materialov v nadvodnom sudostroenii." *Morskoy vestnik* 1 (2013): 7–8.
2. Balchjunas, A. S. "Kratkij obzor ispolzovanija kompozicionnyh materialov pri stroitelstve korablej i jelementov ih konstrukcij." *Nauchnye issledovanija: ot teorii k praktike* 1(7) (2016): 146–147.
3. Anisimov, A. V., V. E. Bahareva, I. V. Blyshko, et al. *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy: sprav.* Edited by I. V. Gorynin, A. S. Oryshhenko. SPb.: NPO «Professinal», 2012.
4. Vasilev, K. A. "Improve the effectiveness of the system of local ventilation during mechanical processing of polymer materials used in modern shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 64–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-64-74.
5. Volkov, V. A. "Sberezhenie jenergii v sistemah ventiljacji za schet vnutrennej ochistki i pereraspredelenija vozduha." *Vosmaja Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotehnika i jenergetika»: tez. dokl.* M.: MJeI, 2001. Vol. 3. Pp. 50–51.
6. Voskresenskij, V. E. *Sistemy pnevmotransporta, pylaulavlivaniya i ventiljacji na derevoobrabatyvajushhih predpriyatijah. Teorija i praktika. Uchebnoe posobie: v 2-h tomah. Tom 2. Chast 1: Sistemy pylaulavlivaniya.* SPb.: Politehnika, 2009.
7. Russian Federation. Sanitary rules and norms 2.2.4.548-96. Hygienic Requirements to occupational microclimate. M.: Minzdrav Rossii, 2001.
8. Russian Federation. State Standard 30494-2011. Zdanija zhilye i obshhestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshhenijah. M.: Standartinform, 2013.
9. Bondar, E. S., A. S. Gordienko, V. A. Mihajlov, and G. V. Nimich. *Avtomatizacija sistem ventiljacji i kondicionirovanija vozduha.* Kiev: Avanpost-Prim, 2005.
10. Baranov, L. I., translator. "Rukovodstvo po proektirovaniju jeffektivnoj ventiljacji (rabochaja versija)." *AVOK* 3 (2003): 20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Васильев Кирилл Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Дацияк Тамара Александровна —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
kirrrrrill@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vasilev Kirill Aleksandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Datsjuk Tamara Aleksandrovna —
Dr. of Technical Sciences, professor.
SPSUACE
kirrrrrill@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149

УДК 621.397

**В. А. Ерофеев,
В. А. Жуков,
А. С. Прякин**

НЕТОЧНОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ И ТЕРМИНОВ — ПУТЬ К ВЕЧНОМУ ДВИГАТЕЛЮ ВТОРОГО РОДА

Статья содержит анализ научных работ, посвященных исследованию циклов тепловых двигателей, в которых имеют место отклонения от классических определений термодинамических понятий и некорректное использование терминов. На основании рассмотренных в статье публикаций показано, что неточное использование терминов и определений приводит к неверным научным выводам, снижая результативность исследований. В статье представлен термодинамический метод исследований как основной инструмент изучения и анализа циклов, показано различие теоретических и действительных циклов тепловых двигателей, указано на необходимость обязательного учета диссипации и деградации энергии в реальных процессах и действительных циклах тепловых двигателей. Особое внимание в статье обращено на недопустимость применения термодинамических уравнений, полученных для идеальных газов при исследовании и сравнении циклов действительных тепловых двигателей с реальным рабочим телом. Представлена схема процесса перехода от первичного энергоносителя (топлива) к полезной механической работе и сопряженная с ним система коэффициентов полезного действия, а также приведены соотношения, связывающие их. Представлен гипотетический идеальный цикл для реальных интервалов температур и давлений, обобщающий идеальные циклы двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, позволяющий установить предельно достижимый термический коэффициент полезного действия идеального цикла в реальных условиях. Содержащиеся в статье рекомендации относительно циклов тепловых двигателей позволяют более точно сформулировать цели исследований, корректно использовать термодинамический метод, основные законы термодинамики и термодинамические формулы, получать точные научно обоснованные выводы во избежание изобретения вечного двигателя второго рода.

Ключевые слова: циклы тепловых двигателей, теоретические и действительные процессы, термодинамический метод, диссипация и деградация энергии, коэффициент полезного действия цикла и двигателя, вечный двигатель второго рода.

Введение

Великий ученый Альберт Эйнштейн писал: «Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область ее применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня классическая термодинамика. Это единственная теория общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута» [1]. Основные понятия термодинамики, такие как теплота, работа, внутренняя энергия, круговой процесс (цикл), термический коэффициент полезного действия (КПД) и др., а также основные положения термодинамики и прежде всего «первое и второе начала термодинамики» изложены в многочисленных учебниках, в том числе в работе [2]. Применение теоретических положений, опирающихся на основные понятия и определения, для решения теплотехнических задач предложено в работе [3], рекомендованной студентам высших учебных заведений. Однако изучение опубликованных в последние годы научных статей и тезисов, а также электронных ресурсов по тепло- и хладотехнике вызывает сомнение в научной компетенции ряда авторов. Ряд публикаций удивляет поверхностными обобщениями в стремлении обосновать существенное повышение КПД тепловых двигателей. При более подробном анализе предлагаемые и описываемые авторами тепловые дви-

гатели оказываются вечным двигателем второго рода. Данная статья направлена на анализ подобных публикаций с целью предостережения исследователей от ошибок и заблуждений, возникающих в результате пространного толкования термодинамических определений и терминов, а также отрицания принятых термодинамических законов — опровержения постулатов термодинамики, базирующихся на всеобщих законах природы.

Основная часть

Выступая с сообщением на тему: «Способ осуществления цикла поршневого ДВС» [4] на семинаре секции судовых энергетических установок Российского научно-технического общества судостроителей им. акад. А. Н. Крылова в апреле 2016 г., В. П. Сладкевич высказал предположение о возможности создания теплового двигателя с КПД выше, чем термический КПД идеального цикла Карно.

Согласно мнению автора работы [5] В. И. Карагусова, КПД идеальных циклов Карно, Стирлинга, Эриксона равны единице, что явно противоречит второму началу термодинамики. Автор работы [6] В. А. Коваленко предлагает повышать удельную мощность тепловых машин при помощи так называемого «совершенствования термодинамики», заявляя при этом, что *«подавляющее большинство изготавливаемых промышленностью тепловых машин работают на основе наименее эффективного из всех известных термодинамических циклов — цикла Карно»*. Анализируя преимущество двигателя Стирлинга, автор той же публикации далее пишет: *«... можно аккумулировать механическую энергию, тормозя двигателем. В этом случае двигатель превращается в тепловой насос»*. Необходимо напомнить, что тепловой насос — не аккумулятор, а нечто иное — это устройство для повышения температурного уровня теплоты с последующим её использованием, например, для нужд отопления [2].

Авторы работы [7], анализируя предлагаемый ими ДВС с аккумулятивным расширением рабочего тела, вводят свой критерий определения энергетической эффективности процесса (или цикла): *«...удельная, на единицу рабочего тела, теоретическая (индикаторная) работа данного процесса (цикла)»*. Но теоретическая (идеального, равновесного, обратимого процесса) и индикаторная (реального необратимого процесса) работы имеют принципиальные различия. Энергоэффективность цикла характеризуется удельными величинами, определяемыми как отношение производимой работы к затратам энергии (теплоты): термическим КПД или расходом топлива к работе, совершаемой за единицу времени; удельным индикаторным или удельным эффективным расходом топлива (кг/(кВт·ч)) в зависимости от степени учета потерь, сопровождающих процесс преобразования теплоты в работу. В той же работе упоминается «отрицательная работа расширения», и нет разделения понятий: *функции процесса* (теплота) и *функции состояния* (внутренняя энергия), а также их изменений в процессе. Нечто подобное имеет место и в работе [8], где авторы приводят понятие «перенос энтропии», когда теплота и энтропия в цикле «передаются». В этой же работе используется понятие «термодинамическая сила». Возможно, что данный термин в теплотехнике трактуется как потенциал (температура, давление и др.), разность которого у рабочего тела и окружающей среды и является в данном случае движущей силой процесса.

В ряде статей отсутствует чёткое определение цели предлагаемых мероприятий. Так, описание приближения политропы к изотерме в процессе сжатия в ДВС при повышении степени сжатия в работе [9] вызывает вопросы: *«Ну и что? Какой в этом смысл?»*. Предложение осуществлять цикл с изотермическим расширением и изменение при этом термического КПД на 1 % [10] вызывает те же вопросы, а также сомнения в экономической целесообразности подобных мероприятий в связи с техническими сложностями реализации изотермического расширения.

Из работы [6] неясно, в чём достоинство рассматриваемого цикла Рейлиса по сравнению с другими циклами тепловых машин. Малопродуктивными, на наш взгляд, являются поиски единого комплексного показателя, характеризующего тепловой двигатель с различных сторон (в том числе удельной мощности), без учёта характеристик конкретного потребителя.

Небрежность формулировок и понятий у «остепененных» авторов приводит их последователей и учеников к термодинамической малограмотности и желанию опровергнуть термодинамические законы. Этому же способствует существенное уменьшение учебных часов в вузах по соответствующим дисциплинам подготовки бакалавров и магистров транспортных и энергомашиностроительных направлений подготовки. В связи с ранее изложенным, мы считаем целесообразным ещё раз обратиться к рассмотрению сущности термодинамического метода исследования и возможностям его применения к тепловым двигателям и решению теплотехнических задач [2], [3]. Термодинамика изучает наиболее общие законы преобразования одного вида энергии в другие. Техническая термодинамика изучает наиболее общие законы преобразования теплоты в работу, чаще всего рассматривая лишь два вида взаимодействия рабочего тела с окружающей средой — силовое и тепловое (иногда к ним добавляют обмен массой).

Идеальными процессами взаимодействия являются равновесные (обратимые) процессы, совершающиеся бесконечно медленно, при бесконечно малой разнице потенциалов dp , dT и прочих. При таких условиях рассматриваются частные процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, политропный, для которых выводят расчётные формулы. Идеальные процессы складывают в идеальные циклы, энергетическая ценность которых характеризуется термическим КПД — отношением полученной в идеальном цикле работы к затратам — подведенной теплоте:

$$\eta_t = \frac{\ell_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1},$$

где $\ell_{\text{ц}}$ — работа, совершаемая за цикл; q_1 — теплота, подводимая к рабочему телу; q_2 — теплота, отводимая от рабочего тела.

Общеизвестных идеальных циклов немного. Из них самым энергетически выгодным является цикл Карно, составленный из изотермы (вся подведенная в процессе теплота полностью переходит в работу процесса) и адиабаты (работа процесса происходит за счёт уменьшения внутренней энергии рабочего тела) расширения и изотермы и адиабаты процессов сжатия (при минимальном отводе теплоты). Таким образом, в заданном интервале температур обратимый (равновесный) идеальный цикл Карно определяет максимальную величину КПД:

$$\eta_{\text{К}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}},$$

где T_{max} — максимальная температура цикла (температура горячего источника); T_{min} — минимальная температура цикла (температура теплоприемника).

Величина термического КПД цикла Карно $\eta_{\text{К}}$ определяет термодинамический предел совершенства тепловых двигателей $\eta_t^{\text{ПЭТ}}$ (КПД предельно эффективных технологий):

$$\eta_{\text{К}} = \eta_t^{\text{ПЭТ}}.$$

Идеальные циклы, в которых две равновесные адиабаты заменяют равновесными эквидистантными политропами, причём теплоту, отводимую по одной политропе, возвращают в цикле по другой политропе (регенерируют с помощью бесконечного числа «регенераторов»), называют *обобщёнными циклами Карно*. Пастор Р. Стирлинг, патентуя в 1816 г. свой двигатель, не подозревал, что идеальным циклом этого двигателя является обобщенный цикл Карно, поскольку последний ещё не написал свою знаменитую книгу («О движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу», 1824 г.), а о термодинамике как о науке ещё не помышляли.

Реальные процессы в тепловых двигателях следовало бы характеризовать как индикаторные, учитывая при этом, что реальные (действительные) циклы ДВС представляются на индикаторных диаграммах. Но попытки описать реальные процессы термодинамическими формулами привели к формированию понятия «реальные термодинамические циклы». При этом часто упускают из виду, что реальные процессы протекают при иных условиях: не бесконечно медленно, а при конечных перепадах давления Δp и температуры ΔT — конечных разностях потенциалов, т. е. неравновесно и необратимо. Термодинамика предложила методы учёта этой разницы — эн-

тропийный и эксергетический, установив при этом, что любая необратимость приводит к потере работоспособности и сопровождается диссипацией и деградацией энергии. *Диссипация* — это рассеяние механической энергии, потраченной на преодоление трения и превращенной в теплоту (потеря количества энергии). *Деградация* — потеря качества (способности преобразования в работу) энергии — снижение температуры при сохранении количества энергии.

В 60-е гг. XX в. в СССР шла серьёзная научная дискуссия о достоинствах и недостатках эксергетического и энтропийного методов оценки потерь от необратимости, пока не выступил академик В. А. Кириллин, уточнивший, что оба метода базируются на утверждении Гюни–Стодола о том, что потери эксергии тем выше, чем больше возрастание энтропии системы вследствие необратимых процессов, протекающих в термодинамической системе, которое формализуется выражением [11]:

$$\Delta Ex = \Delta L_{\text{потерь}} = T_0 \cdot \Delta S,$$

где ΔEx — потеря эксергии; $\Delta L_{\text{потерь}}$ — уменьшение работы вследствие необратимости процессов; T_0 — температура окружающей среды; ΔS — возрастание энтропии системы.

Любая необратимость приводит к возрастанию энтропии. Уменьшение ее возможно лишь за счёт отвода теплоты. Для замыкания рабочим телом цикла от рабочего тела в окружающую среду следует дополнительно отвести часть теплоты и, следовательно, снизить возможность получения работы. То обстоятельство, что реальные циклы тепловых двигателей состоят из неравновесных процессов, следствием чего и является дополнительная потеря работы и снижение эффективного КПД, по-видимому, не учитывается при компьютерном моделировании процессов в работе [5] и других аналогичных работах.

На практике отличие реальных (действительных) процессов и циклов от идеальных (термодинамических) и связанная с этим потеря работоспособности оценивается:

относительным индикаторным КПД

$$\eta_{oi} = \frac{\ell_i}{\ell_{ид}} = \frac{\ell_i / q_1}{\ell_{ид} / q_1} = \frac{\eta_i}{\eta_t}$$

или относительным эффективным КПД

$$\eta_{oe} = \frac{\ell_e}{\ell_{ид}} = \frac{\ell_e / q_1}{\ell_{ид} / q_1} = \frac{\eta_e}{\eta_t}.$$

Следовательно,

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{oi}, \eta_e = \eta_i \cdot \eta_{мех} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{мех},$$

где η_e — эффективный (внешний); η_i — индикаторный (внутренний) и $\eta_{мех}$ — механический КПД.

Таким образом, потери от необратимости учитывают не с помощью использования термодинамических формул энтропийного или эксергетического анализа, а вводя поправочный показатель, устанавливаемый опытным путём. Так, для сравнения идеального и реального компрессоров вводят *изотермический* (для охлаждаемых) и *адиабатический* (для неохлаждаемых) КПД. При расчёте рабочих циклов ДВС используют показатель полноты индикаторной диаграммы, а в работе [12] констатируют, что относительный индикаторный КПД дизелей (по опытным данным) редко превышает $\eta_{oi} = 0,85$. Этим в очередной раз подтверждается очевидная, но забываемая некоторыми авторами истина, что в реальном процессе расширения получают работу меньше, чем в идеальном, а на реальное сжатие затрачивают работу больше, чем в идеальном процессе.

На рис. 1 представлено объяснение физической природы и последовательности процессов перехода преобразования и связывающая их система КПД от первичного источника энергии (топлива) до получения внешней механической энергии.

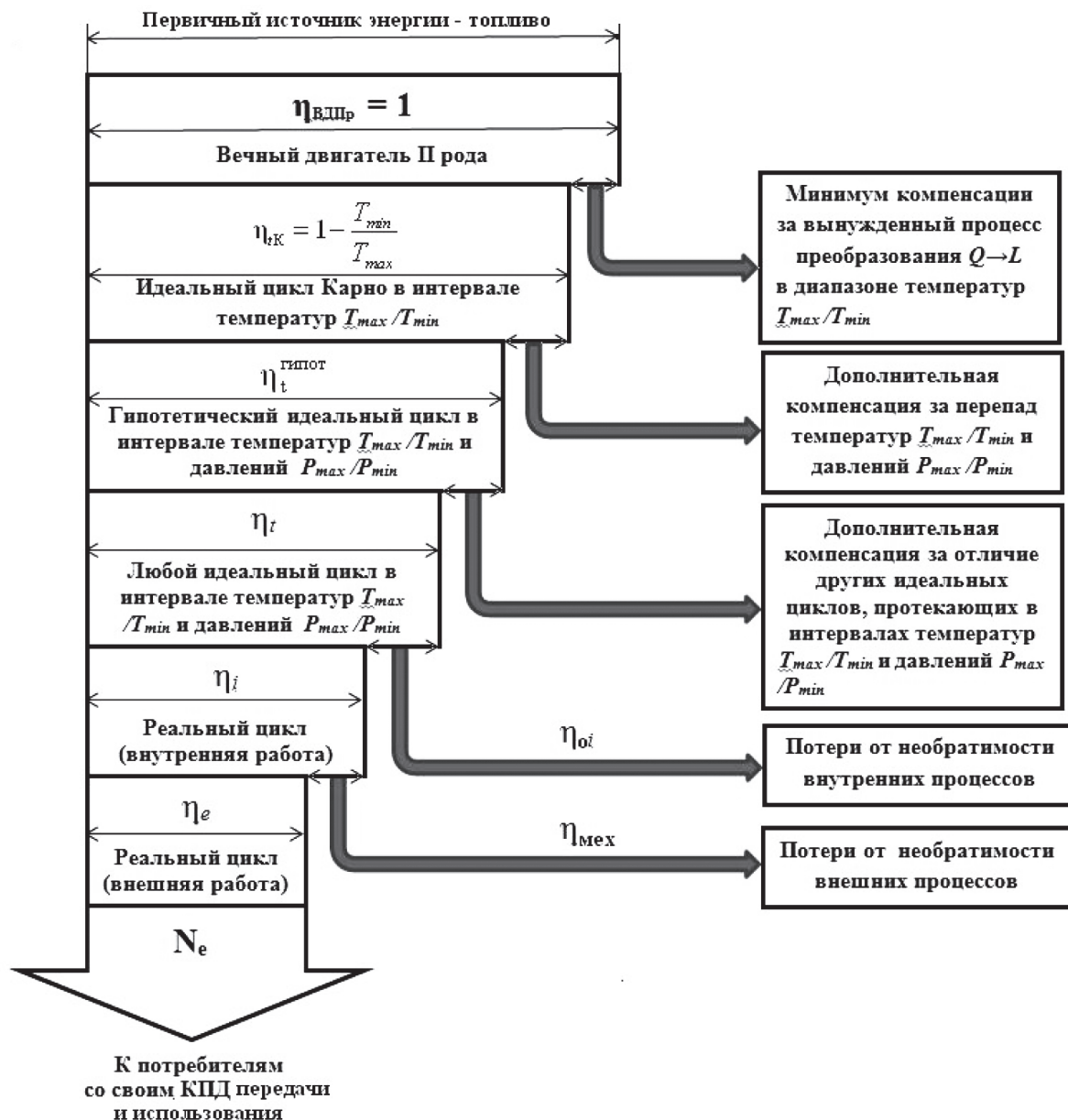


Рис. 1. Физическая природа и последовательность процессов перехода преобразования от первичного источника энергии до получения внешней механической энергии

Вечный двигатель второго рода предполагает преобразование в работу всей подведённой к рабочему телу теплоты: $\eta_{\text{вдпр}} = 1$. В соответствии с формулировкой второго начала термодинамики вечный двигатель второго рода невозможен, требуется компенсация за осуществление вынужденного процесса преобразования теплоты в работу. Минимум этой компенсации обеспечивается идеальным циклом Карно в заданном интервале температур.

В работе [13] предложен гипотетический идеальный цикл не только для реального интервала температур, но и для реального интервала давлений, цикл с изобарным подводом и отводом теплоты, изотермическим охлаждением рабочего тела и дополнительным изотермическим подводом теплоты — «усечённый цикл Карно» (рис. 2).

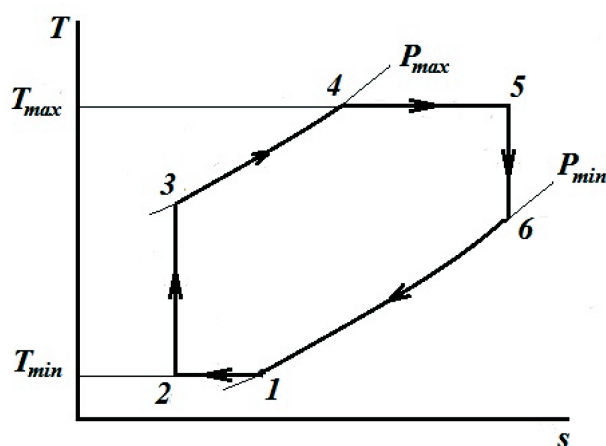


Рис. 2. Гипотетический идеальный цикл

Традиционные формулы термодинамики позволили вывести формулу для вычисления термического КПД такого цикла [14]:

$$\eta_t = 1 - \frac{(\rho_{pt}^{турб} - 1) + \frac{k-1}{k} \cdot \ln \varepsilon_{pt}'}{(\varepsilon_{pt}^{ад})^{(k-1)} \left[(\rho_{pt}^p - 1) + \frac{k-1}{k} \cdot \ln \rho_{pt}' \right]},$$

где ε_{pt}' — степень предварительного изотермического сжатия (процесс 1–2); $\varepsilon_{pt}^{ад}$ — степень окончательного (адиабатического) сжатия (процесс 2–3); ρ_{pt}^p — степень предварительного (изобарного) расширения (процесс 3–4); ρ_{pt}' — степень промежуточного (изотермического) расширения (процесс 4–5); $\rho_{pt}^{турб}$ — степень продолженного (адиабатного) расширений (общий процесс 5–6).

Этот гипотетический цикл обобщает все, в том числе и бинарные, идеальные циклы ДВС и ГТУ, полностью вписывающиеся в него, и устанавливает теоретические предельные величины термических КПД идеальных циклов как существующих, так и возможных новых двигателей, т. е. устанавливает $\eta_{t}^{РДТ}$ — величину термического КПД, реально достижимую в заданном интервале температур и давлений, т. е. промежуточную величину между термическими КПД цикла Карно и циклов ДВС и ГТУ.

Все реальные процессы сопровождаются диссипацией и деградацией энергии — потерями, вызываемыми необратимостью реальных процессов, поэтому при выборе сочетания идеальных процессов и сложения их в идеальный цикл следует выбирать такие процессы, реальное осуществление которых может проходить с наименьшими, но неизбежными потерями от необратимости, т. е. с наибольшими величинами η_{oi} — относительного КПД, так как после выбора идеала лишь повышением величины η_{oi} можно повысить энергетическую эффективность двигателя.

Цель рассмотрения идеального цикла — установление теоретического значения КПД топливоиспользования. Осуществление действительного цикла в реальном двигателе неизбежно приводит к снижению КПД, характеризующего энергоэффективность реального двигателя. В свете изложенного рассмотрим чуть более подробно упомянутые ранее статьи. Для анализа высказываний, приведенных в работе [5], пришлось обратиться к ссылке ее автора на учебное пособие [8]. Оказалось, что выводы о значении КПД цикла Карно, равного единице ($\eta_{tK} = 1$), относятся к другому (эксергетическому) КПД. Автор забыл или не счёл важным об этом упомянуть. Но смыслы эксергетического и термического КПД совершенно различны! Эксергетический КПД любого идеального цикла равен единице, а эксергетические КПД реальных циклов всегда меньше единицы из-за потерь эксергии вследствие необратимости процессов [2].

Авторы публикации [7] аккумулятивным называют процесс предварительного расширения при $p = \text{const}$, сопровождаемый постоянной плотностью рабочего тела за счёт добавления массы ра-

бочего тела. Аккумулятивный процесс расширения, по их мнению, в 2,4 – 6 раз энергоэффективнее изобарного процесса расширения фиксированной массы рабочего тела. Целью их термодинамического анализа является доказательство энергоэффективности всего нового цикла по сравнению с традиционными при одинаковых условиях генерации рабочего тела, что означает одинаковость удельной работы сжатия и удельного количества подведенной теплоты. Расчёты производились по авторской компьютерной модели, адекватность которой объекту (ДВС с предварительным расширением) неизвестна и вызывает сомнения в связи с терминологической небрежностью (неверным использованием функций состояния: внутренней энергии и энтальпии, и функций процесса: теплоты и работы), а также отсутствием учёта потерь энергии от необратимости реальных процессов. В выводах статьи [7] авторы указывают, что ДВС с предварительным расширением на 15 – 30 % превосходит обычный ДВС, что не разъясняется данными, приведенными в таблице этой публикации. Если подсчитать при указанном удельном индикаторном расходе топлива ($g_i = 145 \text{ г/(кВт·ч)}$) индикаторный КПД, то его величина составит 59 % и будет отличаться от прототипа с индикаторным КПД, равным 46,7 %, на 12 % по абсолютной величине. Относительное изменение индикаторного КПД составляет 25 % ($\delta = \frac{\Delta \eta_i}{\eta_i} \cdot 100 = \frac{12}{46,7} \cdot 100 = 25 \%$).

Абсолютное и относительное увеличение индикаторной работы (мощности) в ДВС с предварительным расширением составляет:

$$\Delta N_i = 346 - 283 = 63 \text{ кВт};$$

$$\delta N_i = \frac{\Delta N_i}{N_i} \cdot 100 = 22 \%,$$

т. е. примерно ту же величину, что и приращение индикаторного КПД. При этом в статье [7] не разъяснена физическая природа такого изменения. Если объяснением этого служит увеличение в несколько раз работы изобарного расширения при постоянной плотности (в 2,4 – 6 раз), что само по себе достаточно сомнительно, то почему при одинаковой работе сжатия мощность и КПД возрастают всего лишь на проценты? Вероятнее всего, ошибка заключается в неадекватности компьютерной модели реальному объекту и прежде всего в отсутствии учёта потерь работоспособности вследствие необратимости реальных (индикаторных) процессов.

Адекватность модели объекту — ДВС с предварительным расширением вызывает сомнение по следующим обстоятельствам. Процесс расширения-аккумуляции при постоянном давлении (не изобарном!) и постоянной плотности предполагает прирост массы рабочего тела в количестве $\Delta M = M(\rho - 1)$, что при степени расширения $\rho = 1,2 \dots 1,7$ составляет относительную величину увеличения на 20 – 70 %. Параметры этой дополнительно подаваемой массы рабочего тела должны соответствовать давлению расширения — максимальному давлению цикла p_z , а температура — изменяться от температуры в конце сжатия T_c до максимальной температуры цикла T_z , что в каком-то процессе (устройстве) должно обеспечиваться дополнительным подводом теплоты (при этом авторами заданы такие условия сравнения, как постоянство удельной (на 1 кг рабочего тела) подведённой теплоты). За счёт дополнительно подведённой массы рабочего тела можно объяснить увеличение индикаторной работы (мощности), но при этом опять выявляется нестыковка в относительных цифрах. В статье не приводится количество отведённой теплоты в цикле, что также не позволяет оценить достоверность проведенного сравнительного анализа.

Проблема, которую пытается решать автор статьи [6]: повышение удельной мощности тепловых машин путём ли уменьшения массы или повышения удельной мощности (кВт/кг), свелась в итоге к осуществлению термодинамического цикла Рейлиса и достижению после ряда итераций КПД не менее 60 %. В связи с этим возникает ряд вопросов.

1. Как можно увеличением КПД повысить удельную мощность тепловых машин?

2. О каком из существующих КПД: термическом, индикаторном, эффективном, относительном индикаторном или относительном эффективном, эксергетическом, механическом и др., автор ведёт речь?

3. В чём преимущество термодинамического цикла Рейлиса перед другими термодинамическими циклами?

4. Известна ли автору сущность термодинамического метода исследования и представляет ли он основное свойство идеального цикла Карно и идеальных обобщенных циклов Карно (в том числе и идеального цикла Стирлинга с полной регенерацией теплоты)?

5. Различает ли автор идеальные и реальные термодинамические циклы тепловых машин и связывающие их КПД? Учитывает ли он различия между равновесными (обратимыми) и неравновесными (необратимыми) процессами (циклами) и связанные с необратимостью процессов потери работоспособности (эксергии), диссипация и деградация энергии?

6. Возможна ли реализация на практике идеального изотермического процесса при любой многошаговой итерации (Рудольф Дизель в позапрошлом веке пытался это сделать и чуть не погиб)?

Позволим себе рекомендовать автору статьи [6] и ссылающимся на него последователям, работающим в области исследования тепловых машин, более серьёзно относиться к своим публикациям, тщательнее изучать исследования предшественников, в том числе метод термодинамического исследования (хотя бы в рамках учебников для высшей школы) и не предлагать идеи вечного двигателя второго рода.

В работах [9], [10] и др. также часто отсутствует чёткое целеполагание — *что и зачем исследуется*. По результатам исследований не даются конкретные рекомендации. Так, Н. Б. Ганин [9], исследуя целесообразность повышения степени сжатия ε теоретического цикла ДВС, пришёл к выводу о стремлении политропного процесса к изотермическому и, следовательно, показателя политропы к единице. Этот же автор в работе [10] предложил продолжить осуществление подвода теплоты в цикле Тринклера в процессе расширения; исследовал термодинамический цикл Тринклера с расширением рабочего тела не по адиабате, а по изотерме и установил возможность повышения его термического КПД на 1 %. Вызывает сомнение целесообразность реализации такого цикла. Дальнейшее уточнение, выполненное в публикации [13], позволило предложить такой процесс в цикле с низкотемпературным рабочим процессом, целью которого является снижение выбросов окислов азота при достаточно высоком эффективном КПД двигателя.

Выводы

1. Недостаточная термодинамическая грамотность проявляется в нечеткости определений, терминов и понятий, приводит к путанице в выводах и рекомендациях и, как следствие, к тиражированию предложений, представляющих в конечном итоге вечные двигатели второго рода.

2. Отсутствие понимания различий между идеальными циклами и реальными циклами тепловых машин, а также отсутствие учёта потерь энергии от необратимости реальных циклов, расчёт реальных процессов по термодинамическим формулам, выведенным для идеальных равновесных (обратимых) процессов, приводит к созданию компьютерных моделей, неадекватных реальным объектам, и соответствующим ошибкам.

3. Идеальные циклы устанавливают теоретические пределы энергетической эффективности. Выбор процессов, складывающихся в идеальный цикл, должен производиться таким образом, чтобы при реальном (необратимом) осуществлении потери энергии были минимальны и, следовательно, относительные индикаторный и эффективный КПД были максимально высокими.

4. Требования к тепловому двигателю разнообразны и подчас противоречивы. Эффективный КПД ДВС — лишь один из показателей его совершенства. Следует более чётко формулировать целевую направленность исследований, построить своеобразный приоритетный ряд показателей и в связи с ним подбирать идеальные процессы и строить идеальные циклы. Так, предложенный в издании [13] гипотетический цикл может обеспечить работу в 1,5 – 2 раза выше известных циклов при приемлемом снижении термического и, следовательно, эффективного КПД.

5. Авторы надеются, что представленные в статье материалы будут полезны исследователям, работающим в области тепловых машин, а также будут способствовать повышению их термодинамической грамотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов: в 4 т. / А. Эйнштейн. — М.: Наука, 1967. — Т. 4. — 271 с.
2. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учебник для бакалавриата и магистратуры: в 2 т. / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М.: Юрайт, 2016. — Т. 1. Термодинамика и теория теплообмена. — 306 с.
3. Безюков О. К. Теплотехника. Практикум: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / О. К. Безюков [и др.]; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М.: Юрайт, 2016. — 395 с.
4. Пат. 2477375 Российская Федерация, МПК F02B 33/02 Способ осуществления цикла поршневого двигателя и поршневой двигатель / В. П. Сладкевич, А. Ю. Гарбузов, И. С. Письменный; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. — № 2011117877/06; заявл. 03.05.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. — 9 с.
5. Карагузов В. И. Систематизация анаэробных силовых энергоустановок / В. И. Карагузов // Транспорт на альтернативном топливе. — 2014. — № 5 (41). — С. 49–53.
6. Коваленко В. А. Тепловая машина, реализующая термодинамический цикл Рейлиса // Интернет-газета «Холодильщик.RU». — 2009. — № 8 (56). [Электронный ресурс] / В. А. Коваленко. — Режим доступа: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_best_article_issue_8_2009.htm (дата обращения: 07.11.2016).
7. Равич А. Ф. ДВС с аккумулятивным предварительным расширением рабочего тела / А. Ф. Равич, В. Н. Опрышко, С. Н. Богданов // Двигатель. — 2015. — № 2 (98). — С. 14–18.
8. Карагузов В. И. Установки и системы микрокриогенной техники: учеб. пособие / В. И. Карагузов, Н. В. Карагузова. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 88 с.
9. Ганин Н. Б. Влияние степени сжатия на полноту сжатия быстроходного дизеля / Н. Б. Ганин, И. П. Седунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 27–34.
10. Тузов Л. В. Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным и изотермическим способами подвода теплоты / Л. В. Тузов, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 1. — С. 3–6.
11. Ерофеев В. Л. Теплотехника: учебник для вузов / В. Л. Ерофеев, П. Д. Семёнов, А. С. Пряхин; под ред. В. Л. Ерофеева. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. — 456 с.
12. Кухарёнок Г. М. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания: методическое пособие / Г. М. Кухарёнок. — Минск: БНТУ, 2011. — 62 с.
13. Ерофеев В. Л. Пределы повышения энергетической эффективности топливоиспользования поршневого ДВС / В. Л. Ерофеев, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 2. — С. 33–38.

INEXACTITUDE OF THERMODYNAMICAL DEFINITIONS AND TERMS IS A WAY TO THE PERPETUAL ENGINE OF THE SECOND KIND

The article contains analysis of scientific works, which were devoted to investigations of heat engine's cycles. In these works take place digressions from classical thermodynamical definitions and not correct using of thermodynamical terms. On the basis of publications which were considered the article shows that not correct using of thermodynamical terms follow to the wrong scientific conclusions and lowering of investigation's results. In the article the thermodynamical method of investigation is presented as a main instrument of study and analyzing cycles of heat engines, the difference of theoretical and actual cycles of heat engines is demonstrated, necessity of the without fail calculation of energy's dissipation and degradation in real processes and actual cycles of heat engines is pointed out. The particularly attention in the article is given to inadmissible application thermodynamical equations which were received for ideal gases to investigation and comparison of actual cycles with real working body. The scheme of transition process from energy of fuel to mechanical work and connected with this process system of efficiencies is presented in the article. Equations which connect different efficiencies is given. The hypothetical ideal cycle for real intervals of temperature and pressure is represented. This cycle generalizes ideal cycles of internal combustion engines and gas turbine engines. It's give possible determinate top of arriving thermal efficiency of ideal cycle in real conditions. The article contains recommendations for students, postgraduate students, investigators of heat engine's cycles. These recommendations give opportunity for more exactly determine aims of investigations, correctly using of thermodynamical method, main laws of thermodynamic and thermodynamical equations, to receive correct, well scientific founded conclusions and to avoid invention of the perpetual engine of the second kind.

Keywords: cycles of heat engines, theoretical and real processes, thermodynamical method, energy's dissipation and degradation, efficiency of cycle and engine, perpetual engine of the second kind.

REFERENCES

1. Jejnshitejn, A. *Sobranie nauchnyh trudov*. M.: Nauka, 1967. T. 4.
2. Erofeev, V. L., A. S. Prjabin, and P. D. Semenov. *Teplotekhnika : uchebnik dlja bakalavriata i magistratury*. Edited by V. L. Erofeev, A. S. Prjabin. Vol. 1. M.: Izdatelstvo Jurajt, 2016.
3. Bezjukov, O. K., et al. *Teplotekhnika. Praktikum: uchebnoe posobie dlja bakalavriata i magistratury / T34*. Edited by V. L. Erofeev, A. S. Prjabin. M.: Izdatelstvo Jurajt, 2016.
4. Sladkevich, V. P., A. Ju. Garbuzov, and I. S. Pismennyj. RU 2 477 375 C2, IPC F 02 B 33/02. Sposob osushchestvlenija cikla porshnevoego dvigatelja i porshnevoj dvigatel. Russian Federation, assignee. Publ. 10 March 2013.
5. Karagusov, Vladimir. "Systematization of Anaerobic Power Plant." *Alternative Fuel Transport* 5(41) (2014): 49–53.
6. Kovalenko, V. A. "Teplovaja mashina, realizujushhaja termodinamicheskij cikl Rejlisa." *Internet-gazeta «Holodilshchik.RU»* 8(56) (2009). Web. 7 Nov. 2016 <http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_best_article_issue_8_2009.htm>.
7. Ravich, A. F., V. N. Opryshko, and S. N. Bogdanov. "DVS s akumuljativnym predvaritel'nyim rasshireniem rabocheho tela." *Dvigatel* 2(98) (2015): 14–18.
8. Karagusov, V. I., and N. V. Karagusova. *Ustanovki i sistemy mikrokriogennoj tehniki: uchebnoe posobie*. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2010.
9. Ganin, N. B., and I. P. Sedunov. "Influence of extent of compression on the polytrope of compression of the high-speed diesel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 27–34.
10. Tuzov, L. V., N. B. Ganin, and A. S. Pryakhin. "Ideal Thermodynamic Cycle for Reciprocating Engine with Isochoric and Isothermal Heat Supply." *Dvigatelsestroyeniye* 1 (2015): 3–6.
11. Erofeev, V. L., P. D. Semjonov, and A. S. Prjabin. *Teplotekhnika: Uchebnik dlja vuzov*. Edited by V. L. Erofeev. M.: IKC «Akademkniga», 2006.
12. Kuharjonok, G. M. *Teorija rabochnih processov dvigatelej vnutrennego sgoranija: metodicheskoe posobie*. Minsk: BNTU, 2011.
13. Erofeev, V. L., N. B. Ganin, A. S. Prjabin. "Predely povyshenija jenergeticheskoy jeffektivnosti toplivoispolzovaniya porshnevoego DVS." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2015): 33–38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ерофеев Валентин Леонидович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru
Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Пряхин Александр Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
pralser@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Erofeyev Valentin Leonidovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru
Zhukov Vladimir Anatolevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Pryakhin Alexander Sergeyevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
pralser@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ РАМОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ДВИГАТЕЛЕЙ 8NVD48A-2U НА ПРОМЫСЛОВЫХ СУДАХ

Объектом исследования является главный двигатель 8NVD 48A-2U СТР «Сабск», у которого проверялись тонкостенные вкладыши пятого и шестого рамовых подшипников, после его капитального ремонта. Цель выполненного исследования — определение причин проворачивания вкладышей рамовых подшипников. Для обеспечения надёжной работы рамовых подшипников необходимо выполнять следующие мероприятия: проверять натяг подшипника; обеспечить смазку подшипников; контролировать чистоту масляных фильтров; контролировать температуру смазочного масла; контролировать чистоту смазочного масла; проверять размеры постелей рамовых и шатунных подшипников. В опубликованных работах по выходу из строя подшипников рассматриваются только причины отказов, которые могут возникать как вторичные при некачественной эксплуатации. В статье приведён пример повреждений вкладышей рамовых подшипников двигателя 8NVD48A-2U. Исследования характера повреждений вкладышей рамовых подшипников коленчатого вала показали, что основной причиной проворачивания вкладышей 5-го и 6-го рамовых подшипников было отсутствие натяга вкладышей подшипников вследствие некачественно выполненного ремонта. Кроме того, не была выполнена ревизия подшипников коленчатого вала после ходовых испытаний, т. е. люди, выполнявшие ремонт, отнеслись к нему непрофессионально и халатно. Негативно сработал человеческий фактор, что вызвало аварийную остановку судна. Приведён другой пример, когда в результате правильных действий судового экипажа начало развития аварийной ситуации на главном дизеле типа NVD рыболовного сейнера было обнаружено своевременно.

Примеры свидетельствуют о том, что человеческий фактор является одной из основных причин аварий судовых энергетических установок. В этой связи весьма важно, чтобы судовой экипаж был подготовлен к правильным действиям при возникновении аварийной ситуации в машинном отделении. Для предотвращения негативного влияния человеческого фактора рекомендуются информационные и обучающие меры.

Ключевые слова: главный двигатель, рамовые тонкостенные подшипники, коленчатый вал, натяг подшипников, человеческий фактор.

Введение

Продолжительность эксплуатационного периода промысловых судов и их безопасность во многом зависят от надёжности главного двигателя (ГД). Надёжность ГД в значительной мере влияет на продолжительность и стоимость ремонта, трудоёмкость технического обслуживания и затраты запасных частей. Эффективность эксплуатации дизелей во многом зависит от надёжной работы подшипников кривошипно-шатунного механизма. Одним из узлов, выходящих из строя в эксплуатации, являются рамовые подшипники, причём выход их из строя может сопровождаться очень тяжёлыми последствиями — поломкой коленвала, поэтому, чтобы обеспечить их надёжную работу, необходимо [1]:

- проверять натяг у подшипников;
- проверять размеры постелей рамовых и шатунных подшипников;
- обеспечивать смазку подшипников перед пуском и во время эксплуатации дизеля;
- следить за чистотой смазочных фильтров, регулярно осматривать магнитные фильтры;
- следить за температурой смазочного масла, согласно инструкции завода, на всех режимах эксплуатации;
- проверять чистоту циркуляционного масла в цистерне, в картере и в смазочных трубах дизеля после ремонта.

В опубликованных работах по выходу из строя подшипников рассматриваются только причины отказов, которые могут возникать как вторичные при некачественной эксплуатации. Напри-

мер, в работах [1], [2] на основании 27 аварийных случаев проанализированы причины отказов подшипников коленчатых валов среднеоборотных дизелей (СОД), среди них:

- проворачивание вкладышей из-за повышенного изнашивания (66,7 %);
- проворачивание вкладышей и расплавление антифрикционного слоя (9,5 %);
- другие (нерегламентированная затяжка шатунных болтов, обрыв шатунных болтов из-за нарушения срока их использования, выход из строя масляных фильтров и др.) — 23,8 %.

Отказы рамовых и шатунных подшипников из-за проворачивания вкладышей происходят вследствие низких параметров шероховатости постели вкладышей, увеличения диаметрального зазора в рамовых и шатунных подшипниках более допустимого и перехода режима трения от гидродинамической смазки к полужидкостной (смешанной), а затем и к граничной, что вызывает повышенное изнашивание вкладыша и шейки, снижение давления смазки, повышение температуры в зоне трения, а затем задир, схватывание или расплавление антифрикционного слоя вкладыша. В работе [3] показано, что основной причиной выхода из строя рамовых подшипников является чрезмерная вибрация коленчатых валов двигателей, вызванная низким качеством затяжки анкерных связей, и предложено контролировать затяжку анкерных связей. Исследования влияния вибрации на надежность работы подшипников описаны в работе [4], они не подтвердили наличие повышенной резонансной вибрации, могущей вызвать аварийный отказ подшипников. Обобщение различных видов отказов подшипников сделано в работах [5], [6]. Однако авторы упустили из виду один важный аспект — влияние человеческого фактора на появление отказа. Если персонал, занимающийся ремонтом и эксплуатацией дизелей, недостаточно подготовлен профессионально (низкая квалификация) или психологически (халатность), то, какой бы надёжной техника ни была, появление отказов неизбежно. Примером этого служит следующая авария.

Основная часть

На сейнерах-траулерах рефрижераторных (СТР) проекта 503 типа «Альпинист» в качестве главного установлен четырёхтактный дизель 8NVD 48A-2U (8ЧН32/48) в машино-котельном отделении, расположенном в кормовой части судна. Главный дизель 8NVD 48A-2U номинальной мощностью 970 кВт при частоте вращения 428 мин⁻¹ передаёт крутящий момент через редуктор на ВРШ. На двигателе 8NVD 48A-2U установлены рамовые подшипники второго поколения. Второе поколение подшипников — тонкостенные многослойные подшипники, у которых толщина антифрикционного металла не превышает 1,0 мм, его наносят гальваническим способом [7]. Тонкостенные вкладыши к постелям не подгоняют, а проверяют прилегание постели по спинке вкладыша на краску, оно должно составлять не менее 80 % поверхности постели. Техническое обслуживание шатунных подшипников проводят через 9 тыс. ч, а рамовых — через 18 тыс. ч, при этом проверяют состояние поверхности вкладышей визуально, а износ определяют измерением толщины несущей поверхности [8]. В эксплуатации было зафиксировано несколько случаев повреждений вкладышей рамовых подшипников.

Главный двигатель СТР проекта 503 «Сабск» находился в капитальном ремонте с заменой цилиндрического блока, рамовых и шатунных тонкостенных подшипников коленчатого вала. ГД отработал 41 450 ч. После завершения капитального ремонта СТР «Сабск» вышел в рейс. После того как ГД отработал 93 ч, он был остановлен из-за повышенного нагрева крышек лючков картера пятого и шестого цилиндров, падения давления смазочного масла после фильтра до 0,11 МПа и повышения его температуры перед охладителем масла до 80 °С. Это свидетельствовало о возникновении аварийной ситуации. Для выявления причин необходимо было вскрыть картер двигателя и провести визуальный осмотр, что и было сделано.

После вскрытия у ГД крышек четвертого, пятого и шестого лючков картера обнаружили стружку белого и цветного металлов. Разобрав пятый и шестой рамовые подшипники, установили, что их вкладыши провернулись в постелях. В результате антифрикционный слой тонкостенных вкладышей и рамового подшипника выплавлен полностью, а у шестого подшипника частично. При этом были срезаны стопора верхних вкладышей пятого и шестого рамовых подшипни-

ков, поверхности разъёмов их крышек имели наклёп, а рамовые шейки коленчатого вала имели кольцевые риски и наволакивания антифрикционного металла. Следует заключить, что остановка ГД предотвратила дальнейшее разрушение его деталей. Например, на других дизелях аналогичной конструкции проворачивание вкладышей рамового подшипника приводило к разрушению фундаментной рамы, блока цилиндровой втулки, шатуна цилиндра и повреждению коленчатого вала [4]. Далее необходимо было выявить причины проворачивания вкладышей в постелях.

Одной из причин могло быть некачественное смазочное масло в картере двигателя. Выполненный теплотехнический лабораторный анализ смазочного масла подтвердил его работоспособность. Разборка масляного фильтра показала, что снижение давления смазочного масла до 0,11 МПа после фильтра связано с уменьшением проходного сечения у фильтра и обволакиванием его поверхности стружкой антифрикционных металлов от повреждённых вкладышей подшипников. Контрольная разборка других рамовых и всех шатунных подшипников показала их нормальное состояние.

Исследования характера повреждений вкладышей рамовых подшипников коленчатого вала показали, что основной причиной проворачивания вкладышей пятого и шестого рамовых подшипников стало отсутствие натяга вкладышей подшипников (номинальная высота выступания вкладыша рамового подшипника, согласно техническим условиям на ремонт, составляет 0,19 – 0,22 мм, а у шатунного — 0,16 – 0,19 мм [Технические условия на ремонт ГД 8NVD 48A-2U – 452 – 233.012 УР]). Подтверждением такого заключения является отсутствие натягов и у других вкладышей рамовых подшипников, за исключением первого и восьмого. Это установлено измерением натягов у всех вкладышей подшипников.

Потеря натяга в процессе эксплуатации или установка тонкостенных вкладышей с недостаточным натягом ведёт к коррозионно-механическому изнашиванию соприкасающихся тел при малых колебательных перемещениях затылочной части вкладыша, т. е. к фреттинг-коррозии или к его проворачиванию в постели. Величину натяга вкладыша проверяют по его выступанию над разъёмом постели подшипника или фальшпостели [7]. При установке на дизель новых подшипников завод-изготовитель в категорической форме отвергает проверку натяга вкладышей (качество подшипника гарантируется) при условии, что постель подшипника отвечает техническим условиям (ТУ) на ремонт [Технические условия на ремонт ГД 8NVD 48A-2U – 452 – 233.012 УР]. Однако проверка постели подшипника на предмет соответствия ТУ ремонтной бригадой проведена не была. Кроме проверки размеров постели подшипника, перед проверкой натяга у вкладыша подшипника определяют его разжим (раскрытие вкладыша), что также не было сделано. Этот параметр указывается на чертеже подшипника заводом-изготовителем. Если этот параметр не соответствует техническим условиям на изготовление подшипника, то вкладыш бракуют.

Следует также заметить, что на устанавливаемые вкладыши отсутствовал сертификат качества, что является грубым нарушением со стороны менеджмента судовладельца [8]. Таким образом, был сделан вывод о том, что потеря натяга в подшипниках ГД 8NVD 48A2-U вызвана некачественно выполненным ремонтом. Кроме того, не была выполнена ревизия подшипников коленчатого вала после ходовых испытаний, т. е. люди, выполнявшие ремонт, отнеслись к нему непрофессионально и халатно. Негативно «сработал» человеческий фактор. В итоге это и привело к аварийной остановке судна.

Рыболовный сейнер с ГД 6NVD 36.1-U на переходе получил удар в днище неопознанным плавающим предметом. Затем через сутки произошёл удар гребного винта о неопознанный плавающий предмет. После этого появилась сильная вибрация в кормовой части судна. Капитан принял решение следовать далее. Через сутки работы с повышенной вибрацией давление смазочного масла на входе в главный дизель упало ниже минимально допустимого. Капитан принял решение зайти в ближайший порт и произвести осмотр гребного винта.

Осмотр водолазами показал отрыв левого бортового кия и загиб лопасти гребного винта, после чего судно поставили в док и провели полный осмотр деталей движения главного двигателя и гребного вала. Благодаря этому осмотру были выявлены серьезные отклонения центровки

главного двигателя с гребным валом, повышенные раскёпы коленвала, повышенные величины износов шеек коленвала (превышающие допустимые). Был выполнен соответствующий ремонт. Аварийная ситуация возникла ранее, когда при ударе был сорван бортовой киль. Это привело к деформации корпуса и фундамента двигателя, раскёпы изменились, начался повышенный износ шеек коленвала. Внешне это никак не проявлялось, и требовались специальные замеры, связанные с разборкой двигателя. После возникновения повышенной вибрации и особенно, когда упало давление смазочного масла, экипаж уже ничего не мог сделать для её устранения. Заход в ближайший порт и последующий ремонт позволили восстановить нормальную работоспособность пропульсивного комплекса судна. Можно однозначно считать, что в данном случае, благодаря правильным действиям экипажа, была предотвращена серьёзная авария, связанная с выходом из строя главного двигателя.

Приведённые примеры свидетельствуют о том, что человеческий фактор является одной из основных причин аварий судовых энергетических установок. В этой связи весьма важно, чтобы судовой экипаж был подготовлен к правильным действиям при возникновении аварийной ситуации в машинном отделении. Такая подготовка стала возможной с появлением тренажёров машинного отделения [9], [10]. Современные тренажёры машинного отделения позволяют подготавливать специалистов как к выполнению стандартных процедур, так и к действиям в нештатных ситуациях, развивая и укрепляя полученные теоретические и практические знания и навыки.

Выводы

1. Первопричиной аварийной ситуации в машинном отделении судна, как правило, является человек — из-за упущенных или неправильных действий. Это происходит из-за недостаточной компетентности или психологической пригодности.

2. Рекомендуется использовать тренажёры для моделирования аварийных ситуаций при обучении судовых экипажей.

3. Следует наладить выпуск информационных листов по аварийным случаям с указанием причин и необходимых мер по их предупреждению для повышения квалификации персонала, не только выполняющего ремонт, но также контролирующего и организующего его, в том числе отвечающего за поставку запасных частей необходимого качества.

4. Рекомендуется сделать обязательной дисциплину «Анализ причин повреждений судовых технических средств» в учебной программе подготовки судомехаников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев Л. Б. Анализ видов, причин и последствий отказов подшипников коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. Л. Леонтьев, В. Н. Макаров // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 12-2. — С. 283–287.

2. Леонтьев Л. Б. Влияние эксплуатационных факторов на отказы подшипников скольжения коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надёжности / Л. Б. Леонтьев, А. Л. Леонтьев, В. Н. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 129–138.

3. Заворотный А. А. Повышение надёжности работы рамовых подшипников судовых дизелей 8NVD 48: автореф. дис. ... канд. тех. наук / А. А. Заворотный. — Мурманск, 2005.

4. Соболенко А. Н. Исследование причин повреждений рамовых подшипников при вибрации и деформации упругих систем фундаментных рам ВДГ / А. Н. Соболенко // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2015. — Т. 35. — С. 97–102.

5. Кривощёков В. Е. Оценка надёжности и восстанавливаемости тонкостенных подшипников скольжения судовых дизелей / В. Е. Кривощёков // Судостроение. — 1992. — № 10. — С. 15–17.

6. Худяков С. А. Последствия отказа шатунного подшипника главного дизеля т/х «Проф. Барбанов» / С. А. Худяков // Вестник МГУ. — Серия: Судостроение и судоремонт. — 2008. — Вып. 25. — С. 52–54.

7. Маницын В. В. Технология ремонта судов рыбопромыслового флота / В. В. Маницын. — М.: Колос, 2009. — 536 с.
8. Комплексная система технического обслуживания и ремонта судов. Основное руководство. РД 31.20.50 – 87. — М.: В/О «Мортехинформреклама», 1988. — 220 с.
9. Соболенко А. Н. Повышение эффективности и безаварийности работы СЭУ посредством тренажёрной подготовки её операторов / А. Н. Соболенко, Д. К. Глазюк // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 1. — С. 12–14.
10. Соболенко А. Н. Обобщение опыта эксплуатации тренажёров машинного отделения морского судна / А. Н. Соболенко, Ю. А. Корнейчук, Д. К. Глазюк // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 59–69.

ANALYSIS OF BEDPLATE BEARINGS DAMAGES OF 8NVD48A-2U ENGINES ON FISHING VESSELS

The investigation object is the main engine 8NVD48A-2U on STF «Sabsk», in which thin-walled bushes of bedplate bearings failed to become fixed.

The goal of the investigation is identification of reasons for bushes of 5-th and 6-st bedplate bearings failure. To ensure reliable bedplate bearings operation it is necessary to execute the following:

- to check bedplate bearings tightness;
- to ensure bedplate bearings lubrication;
- to control oil filters purity;
- to control lubricating oil temperature;
- to control lubricating oil purity;
- to check bedplate and connecting-rod bearing beds dimensions,

Publications concerning bedplate bearing damages examine only reasons which can arise as secondary damages due to low quality operation.

The example of bedplate bearing damage of 8NVD48A-2U engine is given. Investigations of bedplate crankshaft bearing damage revealed that the main reason for bushes of 5-th and 6-st bedplate bearings failure to become fixed bushes was the default of bedplate bearings tightness. This took place due to bad repairing. In addition, bedplate crankshaft bearing overhaul was not done after sea trials. It means that people who made maintenance did it negligently. The Human factor worked negatively. This resulted the in emergency ship stop.

In another example the beginning of an emergency situation on fishing seiner main engine was revealed in time. Correct actions of the crew gave an opportunity to reveal the beginning of emergency situation development and to prevent bedplate bearing damages. Given examples indicate that Human factor is one of the main reasons for accidents ship power installations. It is important for the crew to be ready for correct actions when an emergency situation take place in the engine room. To prevent negative human factor influence we recommend information and training measurers.

Keywords: main engine, thin-walled bedplate bearings, crankshaft, bearings tightness, human factor.

REFERENCES

1. Leontev, L. B., A. L. Leontev, and V. M. Makarov. "Analysis of causes and consequences of bearing failure cranked shafts of marine medium-speed diesels." *Fundamental research* 12-2 (2015): 283–287.
2. Leontev, L. B., A. L. Leontev, and V. M. Makarov. "Influence operational factors on failure bearing cranked shafts of marine medium-speed diesels and ways to improve their reliability." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 129–138.
3. Zavorotnyj, A. A. *Povyshenie nadjozhnosti raboty ramovyh podshipnikov sudovyh dizelej 8NVD48*. Abstract of PhD diss. Murmansk, 2005.
4. Sobolenko, A. N. "The investigation of reasons of bedplate bearing damages when vibration and deformations are acting on elastic system of auxiliary engine bedplates." *Nauchnye trudy Dalrybvtuza* 35 (2015): 97–102.
5. Krivoshhokov, V. E. "Ocenka nadjozhnosti i vosstanavlivaemosti tonkostennyh podshipnikov skolzhenija sudovyh dizelej." *Sudostroenie* 10 (1992): 15–17.

6. Hudjakov, S. A. "Posledstviya otkaza shatunnogo podshipnika glavnogo dizelja t/h «Prof. Barabanov»." *Vestnik MGU. Serija: Sudostroenie i sudoremont* 25 (2008): 52–54.
7. Manicyn, V. V. *Tehnologija remonta sudov rybopromyslovogo flota*. M.: Kolos, 2009.
8. *Kompleksnaja sistema tehničeskogo obsluzhivanija i remonta sudov. Osnovnoe rukovodstvo. RD 31.20.50* – 87. M.: V/O «Mortehinformreklama», 1988.
9. Sobolenko, A. N., and D. K. Glazuk. "Improvement of efficiency and fail-safety of marine engines by means of their operators' simulator training." *Fisheries* 1 (2014): 12–14.
10. Sobolenko, Anatolij Nickolaevich, Yuriy Alekseevich Korneychuk, and Dmitry Konstantinovich Glazyk. "Summary of the operation practice of marine engine-room simulators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 59–69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маницын Владимир Викторович —
кандидат технических наук, доцент.
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
manytsynv@mail.ru
Соболенко Анатолий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
sobolenko_a@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Manitsin Vladimir Victorovich —
PhD, associate professor.
Far Eastern State Technical
Fishery University
manytsynv@mail.ru
Sobolenko Anatoly Nikolayevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Marine State University named
after G.I.Nevelskoy
sobolenko_a@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-155-168
УДК 621.43-242:004.62:621.436:629.5

И. И. Кулешов,
В. М. Ходаковский

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОРШНЕВЫХ КАНАВОК ГОЛОВОК ПОРШНЕЙ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Задачей данной работы являлось повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных дизелей. В настоящее время существующие технологии восстановления поршневых канавок головок поршней не обеспечивают необходимую их долговечность. Наиболее перспективной технологией является технология восстановления канавок путём установки противоизносных колец. Однако данная технология нуждается в дальнейшем совершенствовании, так как долговечность головок поршней, восстановленных данным способом, не превышает 16 тыс. ч. Практически, единственным способом упрочнения данных колец является лазерная обработка. К существенному недостатку лазерного упрочнения без оплавления поверхности можно отнести низкую глубину зоны лазерного воздействия, которая достигает 0,3 мм. В свою очередь, существенным достоинством лазерной обработки является отсутствие какого-либо коробления детали вследствие небольших глубин термического влияния. Перспективным способом упрочнения рабочей поверхности противоизносных колец является способ лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, так как, используя данный способ, можно значительно увеличить глубину упрочнённого слоя.

В работе исследовалось влияние лазерного упрочнения с оплавлением поверхности чугунового противоизносного кольца на твёрдость зоны лазерного воздействия, так как в настоящее время нет детальных исследований закономерности изменения глубины и структуры зоны лазерного воздействия в зависимости от изменения параметров лазерной обработки. В результате проведённого экспериментального исследования было выявлено, что при лазерном упрочнении с оплавлением поверхности глубина зоны лазерного воздействия достигает 1 мм, что значительно больше, чем при лазерном упрочнении без оплавления

поверхности. Выведены формулы для расчёта глубины лазерного воздействия для чугунов в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча.

Ключевые слова: повышение работоспособности головок поршней, поршневая канавка, противоизносное кольцо, лазерное упрочнение с оплавлением, лазерное упрочнение чугунных деталей.

Введение

Эффективный срок службы головок поршней (ГП) малооборотных дизелей (МОД) при достижении максимального износа верхней канавки ГП, равного 1,0 – 1,5 мм для дизелей МАН KZ 70/120A и KZ 70/120E, составляет около 15 тыс. ч, после чего производится замена головки поршня [1]. По некоторым сведениям, средняя высота канавки поршня увеличивается на 0,01 мм за 1 тыс. ч работы [2]. Следует отметить, что при увеличении общего износа торца канавки происходит увеличение степени изнашивания к периферии канавки. В работе [3] приводится анализ износа опорной поверхности поршневой канавки, и необходимо отметить то, что скорость изнашивания кольца в два раза меньше, чем канавки. Проведённый авторами работы анализ путём замера величины износа кольца дизеля МАН показал, что при величине износа кольца 0,2 мм износ канавки составил 0,4 – 0,5 мм. Также отмечено, что верхние кольца имеют блестящую полоску по всей длине нижней опорной поверхности кольца, что является следствием прогиба кольца в поперечном сечении в результате давления газов и деформации перемычек ГП. В итоге наблюдается выраженный износ торца опорной поверхности поршневой канавки ГП.

В настоящее время существуют способы, которые позволяют восстановить первоначальную геометрию поршневой канавки. К основным способам можно отнести следующие:

- скос кромок опорных поверхностей канавки ГП с дальнейшей их наплавкой;
- выборка канавок на станке с дальнейшей наплавкой выбранного участка и проточкой новых канавок;
- хромирование канавок;
- установка сменных чугунных противоизносных колец (ПИК) (иногда с поверхностной закалкой) [4].

Недостатками способов, которые включают в себя наплавку износостойкими материалами, являются:

- относительно невысокая технологичность при довольно высоких трудозатратах;
- сравнительно низкое качество и недостаточная долговечность полученных канавок, что приводит к преждевременному выходу из строя поршневых колец (ПК);
- высокая стоимость (может достигать 50 % стоимости детали, а наработка до отказа ГП варьируется в пределах 5 – 9 тыс. ч);
- при наплавке канавок стальных ГП требуется общий отжиг головки (так как возможно изменение структуры материала детали в самом напряжённом месте головки, и только общий отжиг, который не всегда возможен, может восстановить нужную структуру) [1].

К недостаткам способа хромирования поршневых канавок можно отнести:

- неравномерный износ хромированных канавок по образующей;
- наличие трещин в перемычках;
- если величина износа превышает возможную толщину хромового покрытия (0,25 мм), то перед хромированием необходимо производить наращивание поверхности;
- высокая стоимость [5].

Наиболее простым способом восстановления поршневых канавок является способ установки чугунных ПИК. Технологический процесс установки ПИК заключается в проточке ручьёв для их установки и дальнейшей установке колец в ручей.

Преимуществами восстановления канавок ГП способом установки ПИК являются:

- простота установки ПИК;
- низкая стоимость;

— довольно высокая технологичность, так как при износе ПИК его замену представляется возможным произвести судовому экипажу.

Данный способ также имеет свои недостатки, к которым можно отнести:

- потерю плотности посадки через 10 – 12 тыс. ч наработки [2];
- невысокую прочность материала ПИК в сравнении с материалом поршня.

В научно-исследовательской работе «Работоспособность деталей ЦПГ двигателей «B&W» 874 VT 2BF-160 т/х типа «Пула», руководителем которой является Г. С. Щукин [6], авторы приводят данные о наработке и отказах основных деталей ЦПГ. В частности приводятся данные о наработке до отказа поршней судовых МОД «B&W» 874 VT 2BF-160, в головке которых были установлены ПИК. ГП были выполнены из стали специальной ТУ 24-4-01-071-65, ПИК — из чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-79. Авторами обследовались четыре судна типа «Пула». Общее количество цилиндров — 32; на поршне — пять компрессионных колец, одно маслосъёмное; также в ГП завальцовано пять ПИК. Проведённые эксплуатационные испытания показали, что средняя наработка ГП до отказа вследствие поломок ПИК составила 16 тыс. ч при коэффициенте вариации 0,4. По окончании проведения исследования наработка дизелей варьировалась от 39,9 до 50,0 тыс. ч. В период исследования произошло суммарно 107 отказов ГП вследствие поломок ПИК. Авторами отмечено, что поломки ПИК происходили вследствие увеличения зазора в местах их вальцовки в ГП.

Для того чтобы ПИК наиболее плотно прилегал к нижней поверхности канавки ГП, были разработаны такие методы установки ПИК, как:

- проточка под одинаковым углом торцевых перемычек и ПИК, затем — точечная приварка ПИК к головке поршня [7];
- закрепление ПИК в проточенном для него ручье, когда кольцо фиксируется от горизонтального перемещения посредством металлической проставки [8].

Путём установки ПИК способом закатки металлической проставки максимально снижается возможность их поломки. Практика показала, что данный способ позволяет значительно увеличить их срок службы. ПИК, установленные таким способом компанией ООО НТК «АЛЬКОР КО ЛТД», были смонтированы на шесть головок поршней главного двигателя (ГД) HANSHIN 6LUS40 т/х Seatiger в 2004 г. Восстановленные ГП отработали в ГД без происшествий, сколов и разрушений, а также не наблюдался повышенный износ ПК. Следует иметь в виду и то, что устанавливаемое по технологии [8] ПИК также проходит лазерное упрочнение с оплавлением верхней опорной поверхности. После того как данные поршни отработали 6 тыс. ч, была проведена их ревизия, в процессе которой определено, что ПК ГП находится в работоспособном состоянии, зазоры не превышают предельно-допустимые значения. В результате было принято решение оставить данные поршни на второй срок. Также по данной технологии компанией было восстановлено 12 ГП ГД 6UEC 37LA т/х «Айс Бриз» и «Айс Стрим». Нарботка поршней, восстановленных таким способом, составила 10 тыс. ч, после чего был произведён их осмотр. Во время работы происшествий и аварий ГД не было, сколов или разрушений отремонтированных канавок поршней не наблюдалось, повышенного износа ПК также не наблюдалось.

ПИК МОД, как правило, изготавливаются из чугуна СЧ20, СЧ25, СЧ 30 (ГОСТ 1412-85) [9].

В свою очередь, в процессе работы ПК, совершая вращение в канавках со скоростью 0,1 – 1,0 м/с [1] а также поступательные движения вследствие перекадки поршня в верхней мёртвой точке (ВМТ) и нижней мёртвой точке (НМТ), так же, как и канавку ГП, изнашивают ПИК. Следствием этого является приобретение ПИК некоторой конусообразности [3]. Следовательно, возникает необходимость в упрочнении верхней опорной и торцевой поверхности ПИК.

Существуют следующие способы упрочнения рабочих поверхностей противоизносных колец:

- плазменная наплавка противоизносных колец из углеродистых сталей [5];
- лазерное упрочнение чугунных колец без оплавления поверхности [10];
- лазерное упрочнение чугунных ПИК с оплавлением поверхности [11].

К недостаткам упрочнения ПИК путём плазменной наплавкой можно отнести низкую технологичность, наличие коробления детали, необходимость проведения термообработки, из-за чего необходимо изготавливать заготовку большего размера с последующей её механической обработкой.

К существенному недостатку лазерного упрочнения без оплавления поверхности можно отнести низкую глубину зоны лазерного воздействия, которая достигает 0,3 мм [12] – [14]. В свою очередь существенным достоинством лазерной обработки является отсутствие какого-либо коробления детали вследствие небольших глубин термического влияния.

Определение влияния параметров лазерного упрочнения на глубину зоны лазерного воздействия

Задачей данной работы являлось определение влияния лазерного упрочнения с оплавлением поверхности чугунного ПИК на твёрдость зоны лазерного воздействия, так как в настоящее время нет детальных исследований закономерности изменения глубины и структуры ЗЛВ в зависимости от изменения параметров лазерной обработки. Исследовалась структура серого перлитного чугуна после лазерного упрочнения с оплавлением поверхности. Так как ПИК — это деталь, работающая на износ, то данное исследование даёт возможность определить оптимальные параметры лазерной обработки с оплавлением поверхности.

Лазерное упрочнение с оплавлением поверхности проводили на установке «Комета-2». Режимы лазерного упрочнения:

- мощность излучения — 0,9 – 1,2 кВт;
- диаметр лазерного луча — 2,5 мм;
- скорость перемещения луча — 0,01 – 0,04 м/с.

Металлографическое исследование проводилось на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от $\times 50$ до $\times 1000$ до травления и после травления в 4 %-м растворе азотной кислоты в спирте. Измерение твёрдости проводилось на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н и увеличении в $\times 500$.

Исследования исходной структуры чугуна по графиту и металлической основе (по ГОСТ 3443-87) показали:

Графит	ПГ пластинчатый (рис. 1)
Форма ПГф1	(пластинчатая прямолинейная)
Распределение	ПГр1 (равномерное)
Размер	ПГд350 (250 – 500 мкм)
Количество	ПГ6 (5 – 8 %)



Рис. 1. Форма и распределение графита, $\times 50$

Металлическая основа (рис. 2):

Вид структуры	перлит пластинчатый Пт1
Содержание перлита	П (от 98 %)
Дисперсность перлита	Пд0,5 (0,3 – 0,8 мкм)

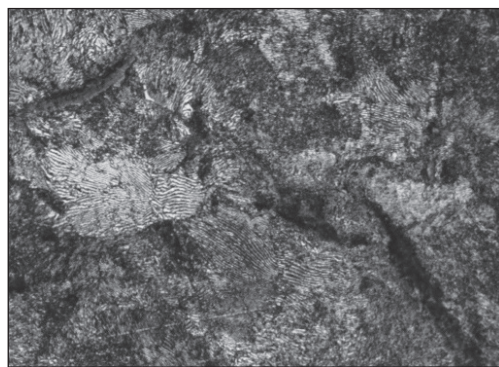


Рис. 2. Микроструктура металлической основы чугуна, $\times 500$

Фосфидная эвтектика (рис. 3):

Строение	ФЭ4 (тройная игольчатая + ФЭ5 (тройная с пластинками цементита)
Распределение	ФЭр2 (разорванная сетка)
Размер ячеек сетки	ФЭд650 (500 – 750 мкм)
Площадь включений	ФЭп2000 (до 2000 мкм)

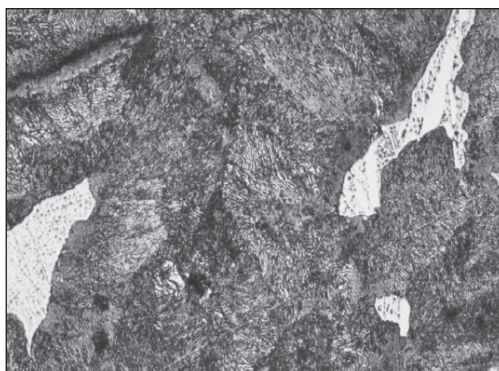


Рис. 3. Строение фосфидной эвтектики, $\times 500$

Результаты определения структуры: структура серого чугуна с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 250 – 500 мкм; металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм; фосфидная эвтектика тройная игольчатого строения и с пластинками цементита в виде разорванной сетки, диаметр ячеек сетки до 650 мкм:

ПГф1–ПГр1–ПГд350–ПГ6–Пт1–П–Пд0,5–ФЭ4–ФЭр2–ФЭд650–ФЭп2000.

Микроструктура чугуна в исходном состоянии показана на рис. 4.

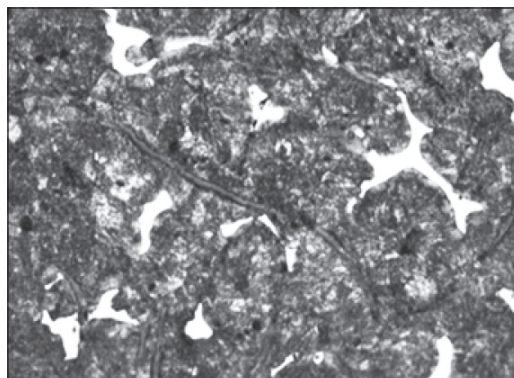


Рис. 4. Микроструктура чугуна в исходном состоянии, $\times 200$

Твёрдость металлической основы сравнительно невысока и составляет 397,3 HV до травления и 310,79 HV после травления. Твёрдость фосфидной эвтектики варьируется от 600 до 822 HV, среднее значение 708 HV.

После лазерной обработки с оплавлением поверхности в структуре металла образуются:

- зона оплавления;
- зона термического влияния (ЗТВ).

Общий вид зоны лазерного воздействия, полученной в режиме оплавления, показан на рис. 5.

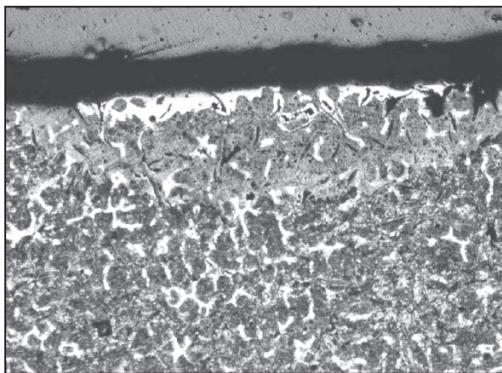


Рис. 5. Общий вид зоны оплавления, $\times 50$

Размеры зоны лазерного воздействия:

общая глубина зоны лазерного воздействия	– 525 мкм;
глубина зоны оплавления	– 75,6 мкм;
глубина ЗТВ	– 450 – 480 мкм;
ширина зоны лазерного воздействия	– 2425 мкм;
ширина зоны оплавления	– 1663 мкм.

Зона оплавления получается при закалке из жидкого состояния.

Структура зоны оплавления состоит из мелких дендритов аустенита, выросших при кристаллизации расплавленного металла и окруженных дисперсным ледебуритом. Главные оси дендритов ориентированы в сторону отвода тепла, т. е. к кромке дорожки оплавления.

Неоднородность зоны оплавления обусловлена кратковременностью лазерного воздействия, не позволяющего получить однородный по составу (прежде всего по углероду) жидкий раствор в расплавленном объеме. Этому способствует и одновременное расплавление участков гетерогенной структуры. Графит обладает большой теплопроводностью, особенно в нагретом состоянии [15], кроме того, графит — практически абсолютно черное тело, что способствует поглощению лазерного излучения. Тепло легко проникает по пластинкам графита и вызывает расплавление металлической основы вокруг пластинок графита (эффект контактного плавления). Расплавление металлической основы эвтектоидного состава запаздывает, а кристаллизация ее начинается раньше. Главным фактором, определяющим конечную структуру этого слоя, является количество растворенного графита за время оплавления [16].

Микротвердость зоны оплавления со структурой *ледебурит + аустенит* — 684 HV-756 HV. В зоне оплавления присутствуют участки со структурой *мартенсит + аустенит остаточный*, их микротвердость 545-585 HV.

Отличительной особенностью строения ЗЛВ чугунов является неровная линия плавления между ЗО и ЗТВ, что обусловлено эффектом контактного плавления. Вследствие разных размеров графитных включений расплавленные объемы в разной степени насыщаются углеродом, что приводит к формированию различных структур после затвердевания:

- ледебурита, микротвердость которого 8400 Н/мм²;
- ледебурита с ячейками аустенита — 6150 ... 7 330 Н/мм²;
- мартенсита — 6000 ... 6500 Н/мм²;
- мартенсита и остаточного аустенита — 5450 ... 5880 Н/мм² (в зоне оплавления).

Микроструктура на границе между зоной оплавления и зоной термического влияния показана на рис. 6.

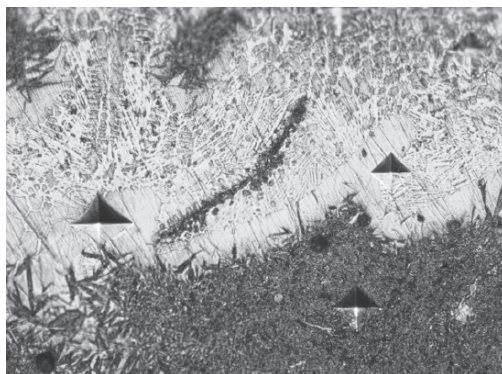


Рис. 6. Микроструктура на границе между ЗО и ЗТВ, $\times 500$

При лазерной обработке поверхности серого чугуна с оплавлением поверхности в зоне термического влияния происходит:

- распад аустенита (металлической основы чугуна);
- превращения перлитографитной составляющей чугуна, связанные с эффектом контактного плавления или только растворения графита в аустените (рис. 7);
- подплавления в местах залегания фосфидной эвтектики (рис. 8).

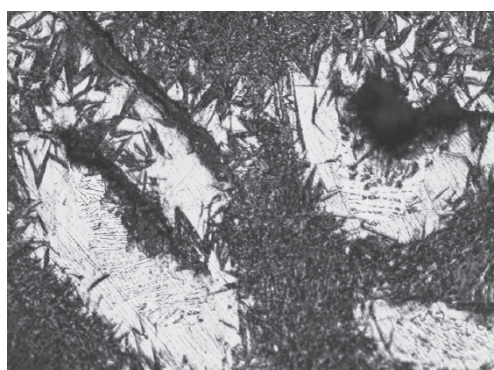
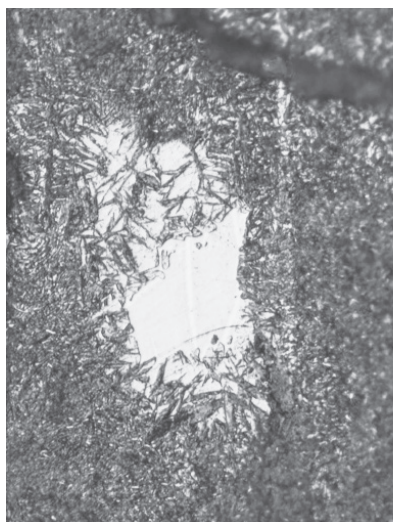


Рис. 7. Подплавление металлической основы около включений графита, $\times 500$, $\times 1,5$

а)



б)

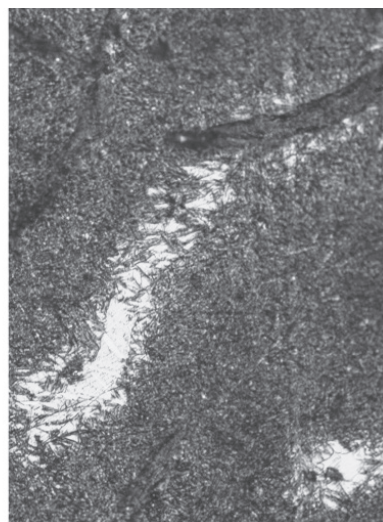


Рис. 8. Подплавление в местах залегания фосфидной эвтектики в ЗТВ:
а — $\times 1000$; б — $\times 500$, $\times 1,5$

Высокая скорость нагрева вызывает значительный перегрев, а высокая скорость охлаждения приводит к разной степени насыщения матрицы углеродом из включений графита. В результате нагрева этой зоны выше критической точки A_{c1} (температур порядка 1147 °С) перлитная основа превращается в аустенит, а потом происходит ее быстрое охлаждение. Степень переохлаждения аустенита определяет механизм и кинетику превращения, а, следовательно, и структуру продуктов превращения [17].

Насыщение расплава из полурасплавленной частицы графита при последующем охлаждении приводит к образованию области со структурой белого чугуна, микротвердость которой находится в интервале 810 ... 1022 HV (рис. 7, 9).



Рис. 9. Микроструктура вокруг включений графита в ЗТВ, $\times 1000$

Светлые области на периферии таких участков образованы в результате диффузии углерода из расплава в металлическую основу чугуна, что приводит к формированию в них структуры мартенсита и остаточного аустенита с невысокой микротвердостью 470-645 HV. По мере удаления от включений графита происходит уменьшение микротвердости за счет уменьшения диффузии углерода в металлическую основу и уменьшения его содержания в кристаллической решетке мартенсита. На участках с температурой, меньшей эвтектической, происходит лишь диффузия углерода из графита в аустенит и образование после охлаждения двухслойных — мартенситной и аустенитной — оторочек, толщина которых уменьшается с увеличением глубины залегания графита вплоть до полного исчезновения [18].

Металлическая основа чугуна в зоне термического влияния темно-серого цвета, она закалена на мартенсит с средней микротвердостью 584 HV.

Микротвердость участков, на которых произошло подплавление ФЭ и произошли структурные превращения, колеблется в пределах 574-1021 HV. На тех участках, где образовался мартенсит + аустенит остаточный, микротвердость — 574-734 HV, а где ледебурит + мартенсит + аустенит остаточный — 901-1021 HV.

В нижней части ЗТВ включения ФЭ (тройная игольчатая) осталась без изменения (в ней не произошло превращений), но микротвердость её колеблется в пределах 950-1042 HV.

Обсуждение основных результатов

По результатам эксперимента были построены математические модели зависимости ожидаемой глубины зоны лазерного воздействия от принятых факторов технологического процесса лазерного упрочнения. В качестве независимых переменных принимались: плотность полезной мощности лазерного излучения (q), скорость перемещения лазерного луча (v). В качестве отклика (зависимой переменной) принималась глубина ЗЛВ, измеренная в двух местах.

Факторы, их уровни и интервалы варьирования, выбранные на основании априорной информации и предварительных экспериментов, приведены в табл. 1. Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Обработка результатов эксперимента проводилась для равномерного дублирования опытов.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Вариант	Уровни факторов			Интервал варьирования
			+1	0	–1	
Плотность полезной мощности q , Вт/мм ²	x_1	1	180	160	140	20
		2	193	173	153	20
Скорость перемещения лазерного луча v , м/с	x_2	1	0,03	0,02	0,01	0,01
		2	0,04	0,03	0,02	0,01

По данным параллельных опытов проводился расчёт построчных дисперсий и проверялась гипотеза однородности дисперсий по критерию Кохрена. Поскольку выполнялось условие $G_{\text{табл}} = 0,6798 > G_{\text{расч}} = 0,415; 0,423$, то ряд дисперсий считался однородным.

Таблица 2

Результаты измерения глубины ЗЛВ

Номер опыта	Матрица планирования		Глубина зоны лазерного воздействия для исследуемых чугунов, мкм			
	x_1	x_2	y_1		y_2	
			Вариант			
			1	2	1	2
1	+	+	0,863	0,825	0,850	0,769
2	–	+	0,613	0,613	0,506	0,506
3	+	–	1,025	0,919	0,944	0,875
4	–	–	0,860	0,816	0,763	0,706

Рассчитывались коэффициенты регрессии и проверялась их статистическая значимость. Статистически значимыми признавались коэффициенты, абсолютная величина которых равна или больше доверительного интервала. В данном случае это линейные коэффициенты b_0 , b_1 , и b_2 . Коэффициенты парного взаимодействия b_{12} статистически незначимы, поэтому из математической модели исключались.

Таким образом, в результате полного факторного эксперимента 2^2 для исследуемого чугуна были получены уравнения регрессии для глубины ЗЛВ в кодированном виде:

$$y_1 = 0,803 + 0,117 x_1 - 0,095 x_2; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,754 + 0,093 x_1 - 0,075 x_2. \quad (2)$$

Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера. При уровне значимости $\alpha=0,05$ табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 3,84$. Поскольку $F_{\text{табл}} = 3,84 > F_{\text{расч}} = 2,229; 1,44$, то принималась гипотеза об адекватности моделей. Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа уравнений для глубины ЗЛВ

Расчётные величины	Результаты расчёта	
	1	2
Коэффициенты регрессии:		
b_0	0,803	0,754
b_1	0,117	0,093
b_2	-0,095	-0,075
b_{12}	0	0
Доверительный интервал $\pm \Delta b_i$	0,068	0,069
Критерий Кохрена G :	0,6798	
табличный		
расчётный	0,415	0,423
Дисперсия адекватности $S^2_{ад}$	$7,688 \cdot 10^{-3}$	$5,151 \cdot 10^{-3}$
Дисперсия воспроизводимости эксперимента S^2_y	$8,944 \cdot 10^{-4}$	$8,944 \cdot 10^{-4}$
Критерий Фишера F :	3,84	
табличный		
расчётный	2,229	1,44

Поскольку линейные части полиномов адекватны, следовательно, глубину зоны лазерного воздействия для каждого чугуна с достаточной точностью можно аппроксимировать уравнениями степенного вида. В результате перехода от кодированных значений к натуральным по формулам для случая, когда плотность полезной мощности изменяется от 140 до 180 Вт/мм²:

$$x_1 = \frac{q-160}{20}; \quad x_2 = \frac{v-0,02}{0,01},$$

получили

$$h_1 = 0,057 + 0,00585q - 9,5v,$$

а когда плотность полезной мощности изменяется от 153 до 193 Вт/мм²:

$$x_2 = \frac{q-173}{20}; \quad x_2 = \frac{v-0,03}{0,01},$$

получили

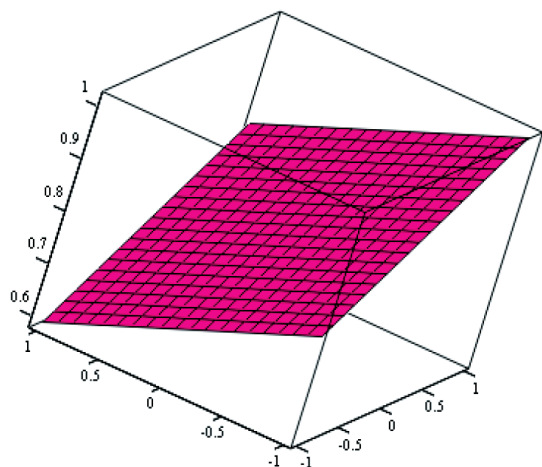
$$h_2 = 0,175 + 0,0047q - 7,5v.$$

Эти формулы позволяют рассчитывать глубину зоны лазерного воздействия для чугунов при различной плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча.

Заключительная часть

В результате проведения эксперимента были определены параметры лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, выведены формулы для расчёта глубины лазерного воздействия для чугунов в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча. Определена максимальная глубина упрочнённой зоны в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча, которая приведена на рис. 9 и 10, и достигает 1 мм.

а)



б)

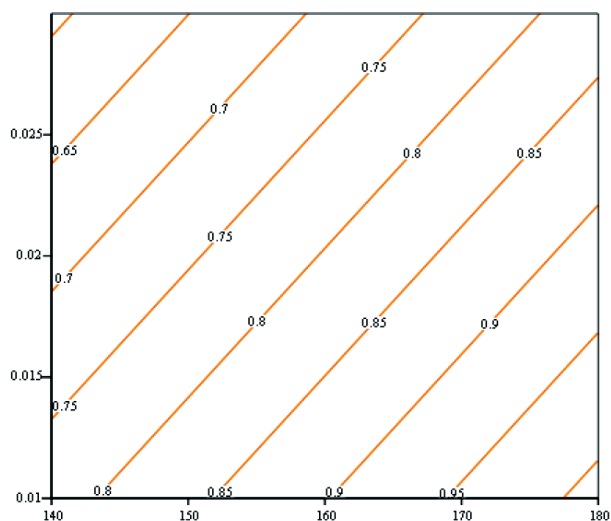
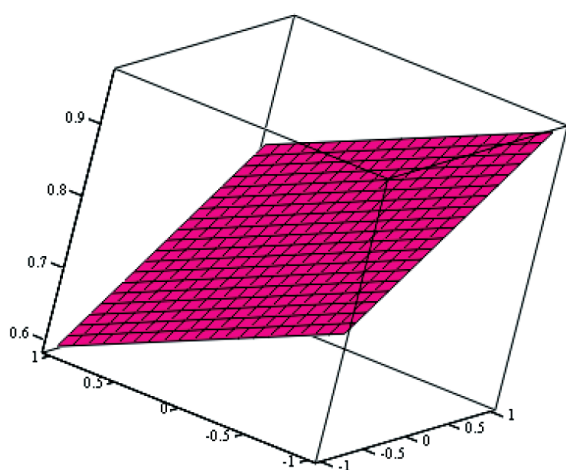


Рис. 10. Геометрическая интерпретация математической модели (1) в кодированной форме (а) и линии одного уровня (б) для этой модели

а)



б)

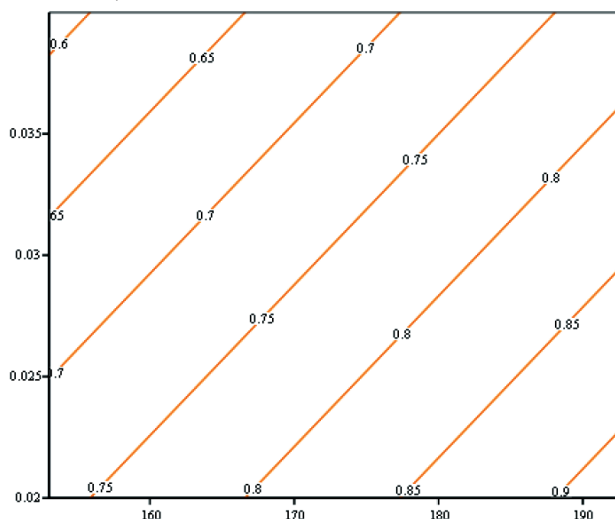


Рис. 10. Геометрическая интерпретация математической модели (2) в кодированной форме (а) и линии одного уровня (б) для этой модели

Выводы

1. Существующие способы восстановления канавок ГП СДВС не обеспечивают достаточную долговечность, а также являются трудоёмкими и нетехнологичными.
2. Наиболее простой в исполнении, и также перспективной технологией восстановления канавок является установка чугунных ПИК, твёрдость рабочей поверхности которых, в свою очередь, влияет на их работоспособность. Следовательно, вследствие особенностей материала ПИК возникает необходимость в их упрочнении.
3. Практически единственной технологией упрочнения рабочей поверхности ПИК без её коробления служит лазерная обработка.
4. Лазерное упрочнение принципиально можно разделить на упрочнение без оплавления поверхности и с оплавлением.
5. Упрочнение рабочей поверхности детали позволяет укрепить её на глубину до 0,3 мм, что на практике является, зачастую, недостаточным.

6. Опытным путём установлено, что лазерное упрочнение с оплавлением рабочей поверхности чугуновой детали характеризуется большей глубиной ЗЛВ (до 1 мм) в сравнении с лазерной обработкой без оплавления поверхности. Также установлены оптимальные параметры глубины лазерного упрочнения с оплавлением в зависимости от плотности мощности и скорости перемещения лазерного луча.

7. Для внедрения лазерного упрочнения рабочей поверхности ПИК требуется дальнейшее совершенствование технологии обработки, целью которой будет являться:

- установление рациональных режимов лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, в том числе выявление влияния режимов лазерного упрочнения с оплавлением поверхности на количество остаточного аустенита в микроструктуре металла;
- разработка технологий для повышения твёрдости упрочнённой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривошеков В. Е.* Восстановление изношенных деталей судовых дизелей. Обзор зарубежного опыта фирмы DMI / В. Е. Кривошеков, В. И. Фадеев. — М.: Транспорт, 1994. — 33 с.
2. *Возницкий И. В.* Двигатели модельного ряда МС 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / И. В. Возницкий. — СПб.: Моркнига, 2008. — 260 с.
3. *Слободянюк И. М.* Влияние износа сопряженных деталей ЦПГ на долговечность судовых дизелей после ремонта / И. М. Слободянюк, Н. С. Молодцов, В. Н. Голобородько // Судовые энергетические установки. — 2010. — № 26. — С. 136–144.
4. *Хмелевская В. Б.* Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. / В. Б. Хмелевская, Л. Б. Леонтьев. — Владивосток: Дальнаука, 2003.
5. *Апчел В. Н.* Повышение долговечности головок поршней судовых дизелей путем упрочнения плазменной наплавкой при ремонте / В. Н. Апчел, И. М. Слободянюк, Н. С. Молодцов // Судовые энергетические установки. — 2014. — № 34. — С. 175–182.
6. *Щукин Г. С.* Работоспособность деталей цилиндро-поршневой группы двигателей «Бурмейстер и Вайн» 874 VT 2BF-160 т/х типа «Пула» в ДВМП / Отчёт о НИР; ДВВИМУ, рук. Г. С. Щукин. — ХДТ-18/79; № ГР 01840087847; инв. № 0284,0092476. — Владивосток, 1984. — 78 с.
7. Пат. 1734976 Российская федерация. МПК В 23 Р 6/00. Способ восстановления канавок под компрессионные кольца поршней / В. И. Дегтярь, Е. Г. Киперник, Л. А. Морозов, И. М. Слободянюк; заяв. и патентообл. Южный научно-исследовательский проектно-конструкторский институт морского флота. — Заявл. 02.11.1989. Оpubл. 23.05.1992, Бюл. № 19. — 4 с.
8. Пат. 1817512 Российская федерация. МПК 6 F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Поршень двигателя внутреннего сгорания / Г. В. Загинайло, М. С. Дальман, В. И. Лапшин, В. А. Блинов, М. В. Флорианская; заяв. и патентообл. Дальневосточное высшее инженерное морское училище им. адм. Г. И. Невельского. — Оpubл. 10.09.1995, Бюл. № 25. — 4 с.
9. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2007. — Т. 1. — 284 с.
10. *Матвеев Ю. И.* Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей / Ю. И. Матвеев, С. С. Казаков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 34–38.
11. Пат. 2008488 Российская Федерация. МПК F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Поршень двигателя внутреннего сгорания / И. О. Мечейко, В. М. Ходаковский; заяв. и патентообл. Дальневосточная государственная морская академия им. адм. Г. И. Невельского. — Заявл. 01.07.91. Оpubл. 28.02.94. — 3 с.
12. *Григорьянц А. Г.* Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. — М.: Высш. шк., 1987. — 191 с.
13. *Матвеев Ю. И.* Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия / Ю. И. Матвеев, С. С. Казаков // Вестник НГИЭИ. — 2011. — Т. 2. — № 1 (2). — С. 41–53.
14. *Ходаковский В. М.* Исследование влияния режима лазерной обработки на глубину и структуру упрочнённой зоны чугуновых деталей судовых ДВС / В. М. Ходаковский, Е. П. Патенкова, И. И. Кулешов // Вестник Морского государственного университета. — 2016. — № 74. — С. 28–36.

15. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / под ред. В. П. Соседова. — М.: Металлургия, 1975. — 336 с.

16. Крапошин В. С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления / В. С. Крапошин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1994. — № 2. — С. 2–5.

17. Арзамасов Б. И. Металловедение / Б. И. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.] / под ред. Б. И. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.

18. Сафонов А. Н. Особенности лазерной закалки поверхности графитизированных сталей и чугунов / А. Н. Сафонов // Вестник машиностроения. — 1999. — № 4. — С. 22–26.

IMPROVING THE OPERABILITY OF THE PISTON'S CROWNS RINGS GROOVES OF LOW SPEED PROPULSION MARINE DIESEL ENGINE

The aim of the article was improving the operability of the pistons crown's rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine. Currently exists methods for the restoration of the pistons crown's rings grooves do not provide the necessary durability. The most promising method is the method of the recovery grooves by installing antiwear rings. However, this method needs further improvement because piston's crowns durability recovered by this method does not exceed 16 000 h. In practice, the only method is to harden antiwear rings is a laser hardening. Among the significant disadvantages of the laser hardening without melting of the surface can be attributed the low depth of the laser action zone, which reaches 0,3 mm. In turn, a significant advantage of the laser treatment is the absence of any warpage due to the small quantity depth of thermal influence.

A promising method of hardening the working surface of antiwear rings is a laser hardening method with melting because, by using this method, may significantly increase the depth of the hardened layer.

The influence of laser hardening with melting surface of the cast-iron antiwear ring of the laser treated area, as there is currently no detailed studies of patterns of change and the depth of laser action zone structure depending on changes in the laser treatment parameters.

As a result experimental investigation it found that laser hardening with melting the surface the depth of influence zone up to 1 mm, which is considerably more than the laser hardening without melting the surface. The formulas for calculating the depth of the laser effects for cast irons, depending on the density of useful power and speed of laser beam

Keywords: improving the operability of the piston's crowns, ring groove, antiwear ring, laser hardening with melting, laser hardening of cast iron parts.

REFERENCES

1. Krivoshhekov, V. E., and V. I. Fadeev. *Vosstanovlenie iznoshennykh detalej sudovykh dizelej. Obzor zarubezhnogo opyta firmy DMI*. M.: Transport, 1994.

2. Voznickij, I. V. *Dvigateli modelnogo rjada MC 50-98. Konstrukcija, jekspluatacija i tehničeskoe obsluzhivanie*. SPb.: Morkniga, 2008.

3. Slobodjanjuk, I. M., N. S. Molodcov, and V. N. Goloborodko. "Vlijanie iznosa soprjazhennykh detalej CPG na dolgovečnost sudovykh dizelej posle remonta." *Sudovye jenergetičeskie ustanovki* 26 (2010): 136–144.

4. Hmelevskaja, V. B., and L. B. Leontev. *Povyšenie nadežhnosti sudovogo oborudovanija tehnologičeskimi metodami: v 3 t.* Vladivostok: Dalnauka, 2003.

5. Apchel, V. N., I. M. Slobodjanjuk, and N. S. Molodcov. "Povyšenie dolgovečnosti golovok porshnej sudovykh dizelej putem upročnenija plazmennoj naplavkoj pri remonte." *Sudovye jenergetičeskie ustanovki* 34 (2014): 175–182.

6. Shhukin, G. S. *Rabotosposobnost detalej cilindro-porshnevoj grupy dvigatelej «Bur-mejster i Vajn» 874 VT 2BF-160 t/h tipa «Pula» v DVMP*. Research report. Vladivostok, 1984.

7. Degtjar, V. I., E. G. Kipernik, L. A. Morozov, and I. M. Slobodjanjuk. RU 1734976 U1, IPC B 23 P 6/00. *Sposob vosstanovlenija kanavok pod kompressionnye kolca porshnej*. Russian Federation, assignee. Publ. 23 May 1992.

8. Zaginajlo, G. V., M. S. Dalman, V. I. Lapshin, V. A. Blinov, and M. V. Florianskaja. RU 1817512 U1, IPC 6 F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. *Porshen dvigatelja vnutrennego sgoranija*. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Sept. 1995.

9. Voznickij, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. M: Morkniga, 2007. Vol. 1.
10. Matveev, Yury Ivanovich, and Sergey Sergeevich Kazakov. "Features of laser processing of piston rings of ship medium-reverse diesel." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2010): 34–38.
11. Mechejko, I. O., and V. M. Hodakovskij. RU 2008488 U1, IPC F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Porshen dvigatelja vnutrennego sgoraniya. Russian Federation, assignee. Publ. 28 Feb. 1994.
12. Grigorjanc, A. G., and A. N. Safonov. *Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki*. M.: Vyssh. shk., 1987.
13. Matveev, Y. I., and S. S. Kazakov. "Formation of structures of grey pig-iron in the zone of laser influence." *Bulletin NGII* 2.1(2) (2011): 41–53.
14. Hodakovskij, V. M., E. P. Patenkova, and I. I. Kuleshov. "Issledovanie vlijaniya rezhima lazernoj obrabotki na glubinu i strukturu uprochnjonnoj zony chugunnyh detalej sudovyh DVS." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 74 (2016): 28–36.
15. Sosedov, V. P., editor. *Svojstva konstrukcionnyh materialov na osnove ugleroda*. M.: Metallurgija, 1975.
16. Kraposhin, V. S. "Effect of retained austenite on the properties of steels and irons after surface melting." *Metal Science and Heat Treatment* 2 (1994): 2–5.
17. Arzamasov, B. I., I. I. Sidorin, G. F. Kosolapov, et al. *Materialovedenie*. Edited by B. I. Arzamasov. M.: Mashinostroenie, 1986.
18. Safonov, A. N. "Osobennosti lazernoj zakalki poverhnosti grafitizirovannyh stalej i chugunov." *Russian Engineering Research* 4 (1999): 22–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулешов Игорь Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Ходаковский Владимир Михайлович.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
igor-igorevich.2011@bk.ru
Владимир Михайлович Ходаковский —
кандидат технических наук, доцент.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
Khodakovskiy@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuleshov Igor Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Khodakovsky Vladimir Mikhailovich.
Maritime State University named after G. I. Nevelskoy
igor-igorevich.2011@bk.ru
Khodakovsky Vladimir Mikhailovich —
PhD, associate professor.
Maritime State University named after G. I. Nevelskoy
Khodakovskiy@msun.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2016 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-169-184
УДК 621.31:658.58

А. В. Саушев,
Е. В. Бова,
К. К. Гаспарян

МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ В РЕЖИМЕ ТЕСТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Статья посвящена решению одной из важнейших задач технической диагностики электротехнических систем, посвященной определению их состояния в процессе наладки и эксплуатации. Диагностическими параметрами являются выходные параметры системы в режиме ее тестового диагностирования. Показано, что для оценки состояния системы и определения ее запаса работоспособности необходима информация о границе области работоспособности. Выделены и рассматриваются три основных способа аппроксимации области работоспособности. Раскрывается сущность метода контроля состояния электротехнических систем по их выходным характеристикам. Анализируются возможные способы задания области работоспособности. Приводятся алгоритмы отображения области работоспособности и других допусковых областей из пространства параметров комплектующих элементов системы в пространство ее выходных, измеряемых характеристик. Для отображения областей из пространства внутренних параметров системы в пространство ее выходных параметров предложено использование факторных моделей, формируемых на основе метода планирования эксперимента. Получены правила распознавания принадлежности или непринадлежности вектора фактического состояния системы ее области работоспособности, а также допусковым областям, которые характеризуют конкретные значения запаса работоспособности системы и определяются формой ее задания. Для электротехнических систем, имеющих вид систем управления, рассматривается альтернативный метод получения уравнений гиперповерхностей, ограничивающих область работоспособности, основанный на построении желаемой частотной характеристики. Приводится пример синтеза системы управления электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием координат. Для случая, когда область работоспособности аппроксимирована совокупностью линейных гиперплоскостей и известны статистические данные о законах распределения первичных параметров системы, рассматривается статистический метод пересчета исходной области работоспособности в пространство измеряемых (контролируемых) характеристик. Излагается методика оценки методической погрешности определения состояния электротехнических систем, основанная на методе статистического моделирования и использовании ЛПТ-последовательностей, на основе которых формируется множество псевдослучайных точек. Предлагаемая методика иллюстрируется примером.

Ключевые слова: электротехническая система, область работоспособности, контроль состояния, запас работоспособности, диагностические параметры.

Введение

Одной из важнейших задач параметрического управления состоянием электротехнических систем (ЭТС) является задача определения их работоспособности или неработоспособности. При этом крайне важно решить и еще одну задачу — определить запас работоспособности ЭТС, под которым понимается степень приближения вектора фактического состояния системы к его предельно допустимому значению [1]. Большинство известных методов диагностирования состояния ЭТС либо не позволяют решить эту задачу, либо решают ее, но с высокой методической погрешностью, которая резко возрастает с увеличением числа диагностических (контролируемых) параметров [2], [3]. Методы диагностирования состояния судовых электрических

средств автоматизации, основанные на идее исключения варьируемого параметра и изложенные в работах [4], [5], характеризуются низкой методической погрешностью. Однако эти методы рассматривают частный случай, когда область работоспособности ЭТС тождественно равна области физической реализуемости системы, определяемой ограничениями на ее внутренние (первичные) параметры [3].

Состояние ЭТС в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором (вектором) параметров, к которым следует отнести:

- входные параметры, характеризующие задающие воздействия $u(t)$ и наблюдаемые на входах системы. Задающие воздействия подразделяются на *управляющие воздействия*, характеризующие рабочие режимы работы ЭТС, и *тестовые* (пробные) воздействия, которые имеют место в режимах наладки и технического диагностирования ЭТС;

- внешние параметры, характеризующие свойства внешней по отношению к ЭТС среды и оказывающие влияние на ее функционирование;

- внутренние параметры $X = (X_1, X_2, \dots, X_p, \dots, X_n)$, характеризующие состояние комплектующих элементов ЭТС, называемые также *первичными параметрами*. К этим параметрам относятся как параметры самих элементов системы, например, величины сопротивлений, индуктивностей, емкостей, масс, моментов инерции, жесткостей упругих связей, так и функции этих параметров, имеющие определенный физический смысл, основными из которых являются коэффициенты усиления и постоянные времени;

- внутренние параметры u^v и Z^v , характеризующие, соответственно, сигналы на входах и выходах электротехнических устройств, входящих как элементы $v = \overline{1, h}$, где h — число элементов в составе ЭТС;

- выходные параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$, характеризующие свойства ЭТС, интересующие потребителя. Они представляют собой параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$ ЭТС, и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность системы. Эти параметры, как правило, являются показателями качества, характеризующими правильность функционирования системы [1].

В качестве диагностических параметров для ЭТС следует рассматривать первичные параметры X или выходные параметры (измеряемые характеристики) Z в режиме тестового диагностирования системы. Это обусловлено тем, что именно первичные параметры определяют состояние ЭТС и лишь в пространстве параметров X возможно определение запаса работоспособности. Методы оценки состояния ЭТС в пространстве параметров Z основаны на отображении области работоспособности также других допусковых областей, принадлежащих области работоспособности, в пространство измеряемых характеристик, что в ряде случаев позволяет решить поставленную задачу более эффективно. При этом под областью работоспособности понимается множество значений первичных параметров, при которых выполняются все требования к выходным Y параметрам системы. Эти требования устанавливаются при проектировании ЭТС на этапе составления технического задания на ее разработку.

Для оценки состояния ЭТС в пространствах первичных и выходных параметров необходима информация о границе области работоспособности, которая может быть задана в виде множества граничных точек или в виде гиперповерхностей. Для технической реализации методов поиска и хранения граничных точек требуется большой объем памяти. Вместе с тем вычислительные возможности современных компьютеров позволяют реализовывать известные алгоритмы поиска граничных точек [6], [7] при достаточно большом числе первичных параметров. В целях контроля состояния системы область работоспособности аппроксимируют более простыми фигурами. Можно выделить три основных способа аппроксимации области работоспособности [6] – [8].

Первый способ предполагает замену области работоспособности гиперпараллелепипедом (брусом), грани которого параллельны осям координат. Построенная таким образом область

определяет независимые допуски, т. е. допуск на каждый из параметров ЭТС не зависит от значений других параметров. В этом случае оценка состояния ЭТС производится с помощью алгоритма контроля по независимым допускам [9]. Если все первичные параметры находятся в пределах своих допусков, то принимается решение о работоспособности системы [9] – [11]. Данный способ является наиболее известным и широко применяемым на практике. Вместе с тем ему присущи два существенных недостатка: во-первых, задача построения бруса является достаточно сложной и для произвольного случая не имеет однозначного решения, во-вторых, и это самое существенное, с ростом размерности пространства первичных параметров методическая погрешность такой аппроксимации резко и нелинейно возрастает. Полученные в работах [3], [6] оценки методической погрешности позволили сделать вывод о недопустимости использования данного подхода для оценки состояния ЭТС при числе первичных параметров больше трех. Второй способ предполагает переход от независимых допусков к зависимым допускам, в виде линейных ограничений. Область работоспособности должна быть задана множеством граничных точек. В результате применения известных методов [6], [12], [13] область аппроксимируют линейными гиперповерхностями, что позволяет существенно снизить методическую погрешность. Третий способ основан на аналитическом описании области работоспособности произвольной формы на основе P - и R -отображений [6], [14], [15].

При разработке методов оценки состояния ЭТС необходимо учитывать исходные данные, размерность системы и априорную информацию о форме и задании области работоспособности. Методы контроля состояния ЭТС должны иметь критерии, позволяющие распознавать принадлежность любой произвольной точки R_i области работоспособности и оценивать запас работоспособности системы.

При контроле состояния ЭТС по независимым допускам задача решается весьма просто. Координаты точки R_i сравниваются независимо друг от друга с допусками (предельными координатами по каждому параметру), и при выполнении всех неравенств делается вывод о принадлежности точки области работоспособности и, как следствие, о работоспособном состоянии ЭТС. При более точной аппроксимации области работоспособности и переходе к зависимым допускам такое правило не работает, поэтому необходимо решение следующих задач: разработка метода оценки состояния ЭТС в пространстве выходных параметров Z на основе информации о границе области работоспособности и разработка методики оценки достоверности контроля в пространстве этих параметров.

Метод контроля состояния электротехнических систем по измеряемым характеристикам

Метод контроля состояния ЭТС по выходным параметрам (измеряемым характеристикам) реализуется путем подачи на ее вход зондирующих сигналов известной формы, измерения характеристик выходных сигналов и проверки выполнения условий работоспособности для результатов измерений.

Условия работоспособности могут быть односторонними и двухсторонними, причем для второго (более общего) случая они имеют вид:

$$\begin{aligned} Y_{j\min} &\leq Y_j = F_j(\mathbf{X}) \leq Y_{j\max}, \quad j = \overline{1, m}; \\ Z_{j\min}^v &\leq Z_j^v = F_j^v(\mathbf{X}) \leq Z_{j\max}^v, \quad v = \overline{1, h}; \\ X_{i\min} &\leq X_i \leq X_{i\max}, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Y_{j\max}(Z_{j\max}^v)$, $Y_{j\min}(Z_{j\min}^v)$, $Y_j(Z_j^v)$ — соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значения j -го выходного (внутреннего) параметра; $F_j(\mathbf{X})$ и $F_j^v(\mathbf{X})$ — операторы связи первичных параметров ЭТС с ее выходными Y и внутренними Z параметрами соответственно.

Измерение характеристик можно представить как результат преобразования выходных сигналов ЭТС с помощью известных фильтров. При необходимости независимость друг от друга результатов измерений можно обеспечить как за счет выбора разных выходных фильтров, так и за счет выбора соответствующих входных сигналов. Для большинства ЭТС вполне достаточным является использование единичного ступенчатого или импульсного входного воздействий. Для обеспечения требуемой полноты контроля общее число измеряемых значений выходных сигналов должно быть не меньше числа существенных первичных параметров ЭТС, под которыми понимаются параметры комплектующих элементов системы, имеющие наибольшую чувствительность к этим сигналам [9]. Так как при каждом измерении входной сигнал и при необходимости преобразующий фильтр являются известными, измеряемые характеристики, составляющие вектор $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_c)$, также являются известными функциями $\mathbf{Z} = F_z(\mathbf{X})$ первичных параметров системы $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. Такими характеристиками могут быть временные (переходная и импульсная переходная функция) и частотные характеристики ЭТС.

Для построения функций $F_z(\mathbf{X})$ можно воспользоваться методами планирования эксперимента [15]. С целью задания условий работоспособности в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ достаточно выразить первичные параметры $\mathbf{X}$ через параметры $\mathbf{Z}$ и подставить их в уравнения, задающие условия работоспособности. Эта операция будет соответствовать отображению области работоспособности $\mathbf{G}$ в пространство измеряемых характеристик $\mathbf{Z}$ в допусковую область $\mathbf{D}_z$.

Рассмотрим возможные способы такого отображения. Одним из наиболее простых способов является использование П-отображения [6], [15]. Уравнения $F_z(\mathbf{X})$ при этом получают при помощи специально организованного эксперимента. Полученные уравнения будут иметь вид полиномов, которые, как отмечается в работах [6], [15], имеют порядок не выше второй степени. Далее путем решения данной системы уравнений выражают параметры $\mathbf{X}$ через параметры $\mathbf{Z}$ и подставляют их в уравнение, аналитически описывающее область работоспособности. Полученная зависимость будет представлять собой аналитическое описание допусковой области $\mathbf{D}_z$. Альтернативным вариантом решения задачи является случай, когда область работоспособности задана множеством граничных точек. В результате перебора этих точек, используя уравнения (1), можно получить множество граничных точек, описывающих допусковую область $\mathbf{D}_z$, которую для простоты будем также обозначать $\mathbf{F}$.

В случае аппроксимации области работоспособности линейными функциями задача отображения области $\mathbf{G}$ в допусковую область $\mathbf{D}_z$ существенно упрощается. В этом случае достаточно отобразить для каждой линейной гиперповерхности лишь n граничных точек, по значениям которых может быть получена соответствующая гиперповерхность в пространстве параметров $\mathbf{Z}$. Далее аналогичным образом, следуя методу сужающихся областей [1], [16], [17], осуществляется отображение подобластей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$, и т. д., расположенных эквидистантно друг другу, в пространство параметров $\mathbf{Z}$. Полученные при этом области $\mathbf{D}_{z1}(\mathbf{F}_1), \mathbf{D}_{z2}(\mathbf{F}_2)$ и т. д. будут определять соответствующий запас работоспособности ЭТС [1], [16].

При возможности осуществления контроля непосредственно в пространстве параметров $\mathbf{Y}$ аналогичные отображения областей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ и т. д. производятся в пространство выходных параметров ЭТС. Если область работоспособности задана линейными гиперповерхностями, то для отображения областей $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ и т. д. в соответствующие области $\mathbf{D}_{y1}, \mathbf{D}_{y2}$ и т. д. достаточно отобразить лишь по одной любой граничной точке, принадлежащей каждой линейной гиперповерхности, расчеты при этом существенно упрощаются. Для иллюстрации предлагаемого метода без потери общности результата будем для простоты считать, что размерности пространства выходных (измеряемых) и первичных параметров равны двум.

В процессе параметрического синтеза при использовании для поиска номинальных значений внутренних параметров метода сужающихся областей область $\mathbf{G}$ разбивается на подобласти $\mathbf{G}_i$, каждая из которых определяет запас работоспособности λ_i . На основании отображения $\Phi_z: \mathbf{G} \rightarrow \mathbf{F}$ в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ областям $\mathbf{G}_i$ будут соответствовать области $\mathbf{F}_i$.

Для случая, когда не требуется выполнение операций дифференцирования, а число параметров и ограничений равно двум: $m = n = 2$, область работоспособности аналитически задается известным уравнением [6], [14]:

$$G = 0,5(M + P - |M - P|), \quad (2)$$

где $M = 0,5(c + d - |c - d|)$; $P = 0,5(e + f - |e - f|)$;

$$c = Y_{1\max} - Y_{1\min} - |2\rho_1(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}|; d = Y_{2\max} - Y_{2\min} - |2\rho_2(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}|;$$

$$e = X_{1\max} - X_{1\min} - |2X_1 - X_{1\max} - X_{1\min}|; f = X_{2\max} - X_{2\min} - |2X_2 - X_{2\max} - X_{2\min}|.$$

Получим уравнение области **F**. С этой целью для каждой гиперповерхности f_j границы области **G**, описываемых для примера уравнениями c, d, e, f , сформируем совокупность N_q граничных точек, равных числу значимых коэффициентов в уравнениях $\rho_j(X_1, X_2) = 0$. По этим точкам получим уравнения кривых I_1, I_2, I_3, I_4 составляющих область **F**:

$$X_i^{(1)} = X_i^{(0)} + (\partial f_j^{(0)}(\mathbf{X}) / \partial X_i) \Delta l_j / |\text{grad} \partial f_j^{(0)}(\mathbf{X})|.$$

При условии, что $h = 2$, получим:

$$F = I_{14} + I_{58} - |I_{14} - I_{58}| = 0;$$

$$I_{14} = 0,25(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - |I_1 - I_2| - |I_3 - I_4| - |I_1 + I_2 - I_3 - I_4| + |I_3 - I_4| - |I_1 - I_2|);$$

$$I_{58} = 0,25(I_5 + I_6 + I_7 + I_8 - |I_5 - I_6| - |I_7 - I_8| - |I_5 + I_6 - I_7 - I_8| + |I_7 - I_8| - |I_5 - I_6|).$$

Аналогичным образом определяются границы подобластей $\mathbf{F}_i$. Каждой подобласти $\mathbf{G}_i(\mathbf{F}_i)$ соответствует свой запас работоспособности ЭТС. Так, например, для подобластей $\mathbf{G}_1(\mathbf{F}_1)$, $\mathbf{G}_2(\mathbf{F}_2)$, $\mathbf{G}_3(\mathbf{F}_3)$ запишем:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{F}_1): \lambda_1 \in [0; I_1/I_0]; \quad \mathbf{G}_2(\mathbf{F}_2): \lambda_2 \in [I_1/I_0; I_2/I_0]; \quad \mathbf{G}_3(\mathbf{F}_3): \lambda_3 \in [I_2/I_0; 1].$$

Оценка состояния ЭТС сводится к распознаванию в пространстве R^c параметров $\mathbf{Z}$ принадлежности вектора текущего состояния системы той или иной подобласти $\mathbf{F}_\beta$, $\beta = \overline{1, S}$, где S — число подобластей, для каждой из которых определен запас работоспособности λ_β .

Задача распознавания решается следующим образом. Если после подстановки полученных в результате контроля значений $Z_q, q = \overline{1, k}$ в последнее уравнение окажется, что $F < 0$, следовательно, ЭТС находится в работоспособном состоянии и далее проверяется справедливость выполнения неравенств $F_\beta < 0, \beta = 1, 2, \dots, (S + 1)$. Если $F_\beta \leq 0$ и $F_{\beta+1} > 0$, то вектор текущего состояния ЭТС принадлежит подобласти $\mathbf{F}_\beta$ и запас работоспособности системы равен λ_β . Если $F > 0$, то система неработоспособна. В этом случае осуществляется параметрическая коррекция настраиваемых параметров ЭТС, рассмотренная, например, в работах [18], [19].

Для иллюстрации метода проанализируем простейший пример — делитель напряжения, схема которого приведена на рис. 1.

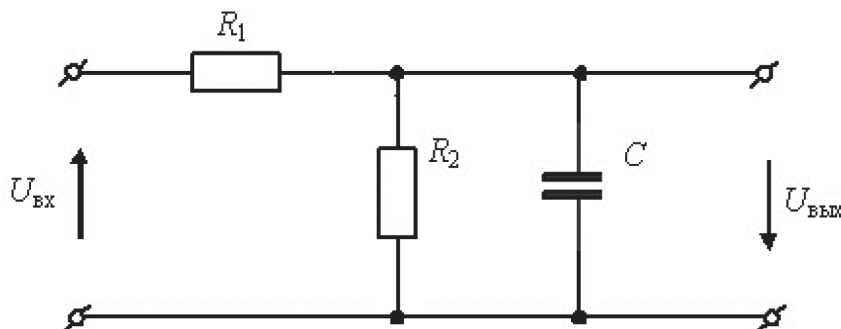


Рис. 1. Принципиальная схема делителя напряжения

Условия работоспособности делителя имеют следующий вид [3]:

$Y_1 = \tau < 0,5 \cdot 10^{-6}$ — постоянная времени перезаряда емкости, с;

$Y_2 = P < 0,1$ — мощность рассеяния, Вт;

$Y_3 = U_{\text{вых}} \in [4; 6]$ — напряжение на выходе делителя, В.

Параметры делителя имеют следующие номинальные значения [3]:

$R_{1\text{ном}} = R_{2\text{ном}} = 0,68 \text{ кОм}$; $C_{\text{ном}} = 1 \text{ нФ}$; $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$ — входное напряжение.

Для наглядности изложения следует предположить, что значение емкости конденсатора в процессе эксплуатации не изменяется и ограничения на значения первичных параметров не учитываются. Установим связь между показателями качества и параметрами делителя. На основе известных из электротехники законов получим:

$$Y_1 = \frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}; Y_2 = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R_1 + R_2}; Y_3 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 + R_2}.$$

Следуя работам [6], [12], запишем аналитическое описание области работоспособности делителя. Учитывая, что сопротивления резисторов выражены в кОм, получим:

$$G = \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \varphi_3 \wedge \varphi_4;$$

$$\varphi_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} - Y_1 = 0,5 \cdot 10^{-6} - \frac{R_1R_2 \cdot 10^{-6}}{R_1 + R_2}; \varphi_2 = 0,1 - Y_2 = 0,1 - \frac{0,1}{R_1 + R_2};$$

$$\varphi_3 = Y_3 - 4 = \frac{10R_2}{R_1 + R_2} - 4; \varphi_4 = 6 - Y_3 = 6 - \frac{10R_2}{R_1 + R_2}.$$

На основании формулы (2) аналитическое описание области работоспособности, определяющее допустимые пределы изменения первичных параметров R_1 и R_2 для рассматриваемого примера, будет иметь следующий вид:

$$G = 0,25 \left(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - |\varphi_1 - \varphi_2| - |\varphi_3 - \varphi_4| - |\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4| + |\varphi_3 - \varphi_4| - |\varphi_1 - \varphi_2| \right).$$

На рис. 2, а приведены ограничительные линии $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, которые определяют область работоспособности делителя напряжения. Подставляя в уравнение аналитически описывающую область работоспособности функции ограничения, после приведения подобных членов окончательно получим

$$G = 0,25 \left(102,5 - \frac{100 + R_1R_2}{R_1 + R_2} - \left| \frac{100 - R_1R_2}{R_1 + R_2} - 99,5 \right| - \left| \frac{20R_1}{R_1 + R_2} - 10 \right| - \right. \\ \left. - \left| 98,5 - \frac{100R_1}{R_1 + R_2} + \left| \frac{20R_1}{R_1 + R_2} - 10 \right| - \left| \frac{100 - R_1R_2}{R_1 + R_2} - 99,5 \right| \right| \right).$$

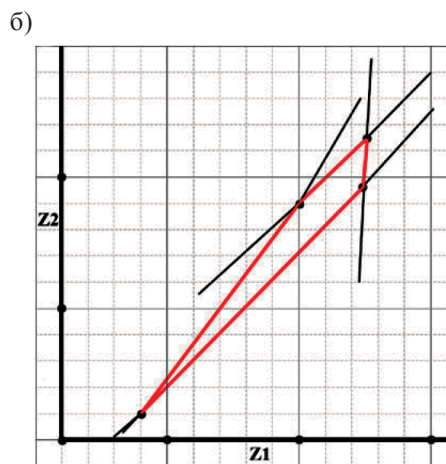
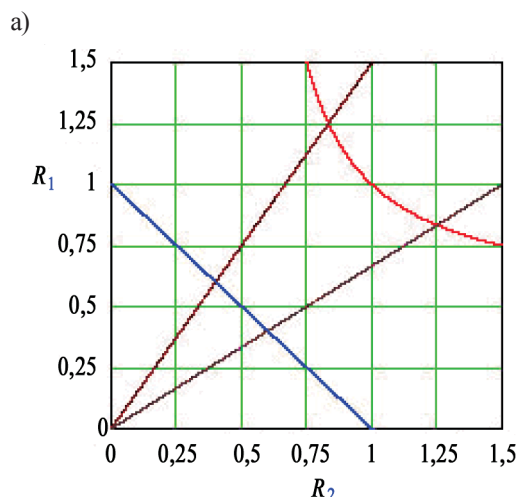


Рис. 2. Область работоспособности делителя напряжения (а) и ее отображение в пространство измеряемых характеристик (б)

Для оценки состояния делителя напряжения достаточно в последнее уравнение подставить текущие значения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 . Схема находится в работоспособном состоянии, если выполняется неравенство $G \geq 0$. В качестве контролируемых параметров будем рассматривать характерные точки переходной характеристики делителя. Установим связь между контролируемыми Z и внутренними X параметрами рассматриваемого устройства. Переходная характеристика схемы определяется следующим уравнением:

$$C_p + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = U_{\text{вх}} / R_1,$$

где p — оператор дифференцирования.

При подаче на вход схемы ступенчатого входного воздействия напряжение на ее выходе будет изменяться по следующему закону:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пр}} \left(1 - e^{-T_i/t^*} \right), \quad (3)$$

где $U_{\text{пр}} = U_{\text{вх}} R_1 / (R_1 + R_2)$; $t^* = C / (U_{\text{вх}} / R_1 - (R_1 + R_2) / R_1 R_2)$; $U_{\text{вх}} = 10$ В.

Переходный процесс носит аperiодический характер. Зная длительность этого процесса, равную $(3 - 4) t^*$, выберем произвольно два момента времени: $T_1 = 0,1$ мкс и $T_2 = 0,2$ мкс. Этим моментам времени будут соответствовать два строго определенных значения выходного напряжения, которые обозначим, соответственно, Z_1 и Z_2 . Установим связь между параметрами Z_1 , Z_2 и $R_1(X_1)$, $R_2(X_2)$. Воспользуемся для этой цели методами теории планирования эксперимента. Ограничимся линейной регрессионной моделью. В соответствии с матрицей полного факторного эксперимента, для $R_1 \in [0,4; 1,25]$ кОм, $R_2 \in [0,4; 1,25]$ кОм. На основании уравнения (3) получим значения функции отклика, приведенные в таблице. Интервалы варьирования сопротивлений R_1 и R_2 устанавливались согласно исходным уравнениям и рис. 2.

Матрица планирования эксперимента для делителя напряжения

№ п/п.	Факторы		Функция отклика	
	X_1	X_2	Z_1 , В	Z_2 , В
1	+	+	2,364	3,610
2	+	–	6,711	7,477
3	–	+	0,909	1,477
4	–	–	4,323	4,908

На основании известных формул расчета коэффициентов аналитических моделей [15] получим следующие регрессионные зависимости:

$$Z_1 = 3,577 + 0,961R_1 - 1,94R_2 - 0,233R_1R_2;$$

$$Z_2 = 4,368 + 1,176R_1 - 1,825R_2 - 0,109R_1R_2.$$

На рис. 2, б приведена допусковая область в пространстве параметров Z .

Выражая из последней системы уравнений первичные параметры R_1 и R_2 через переменные состояния Z_1 и Z_2 , осуществим обратное отображение области F в область M . При этом получим:

$$R_1 = 4,22 + 3,4Z_1 - 3,04Z_2 + \left((4,22 + 3,4Z_1 - 3,04Z_2)^2 - 16,47 + 3,33Z_1 + 7,84Z_2 \right)^{1/2};$$

$$R_2 = -1,61 - 2,01Z_1 - 1,78Z_2 + \left((1,61 + 2,01Z_1 - 1,78Z_2)^2 + 0,46 + 8,62Z_1 - 5,98Z_2 \right)^{1/2}.$$

Наряду с использованием П-отображений [15] для описания ограничивающих гиперповерхностей в неравенствах (1.2), при оптимизации ЭТС, имеющих вид систем управления, можно использовать подход, основанный на построении желаемой частотной характеристики. Однако поскольку построение такой характеристики для системы высокого порядка затруднительно, можно определить желаемую характеристику для системы второго порядка, а затем аппроксимировать

параметры реальной системы так, чтобы они как можно ближе совпали с желаемыми характеристиками.

Пусть для системы второго порядка, характеризующей электропривод постоянного тока, заданы следующие условия работоспособности: $Y_1(t_{\text{пп}}) \leq 0,1$ с — длительность переходного процесса; $Y_2(\sigma) \in [0,025; 0,1]$ с — допустимое перерегулирование; $Y_3(\delta) \leq 0,025$ с — допустимое отклонение от установившегося состояния. Первичными параметрами, определяющими динамические характеристики этой системы, являются собственная частота ω_0 и коэффициент демпфирования ξ . Согласно работе [20], связь между показателями качества и первичными параметрами системы имеет следующий вид:

$$\xi = \ln|1/\sigma| / \left(\pi^2 + \ln^2|1/\sigma| \right)^{1/2}; \quad \omega_0 = \ln|1/\sigma| / \xi t_{\text{пп}}.$$

Систему второго порядка можно представить последовательным соединением апериодического и интегрирующего звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 , охваченными единичной обратной связью. При этом, согласно работе [20], можно записать:

$$T_1 = 1/2\xi\omega_0; \quad T_2 = 2\xi/\omega_0.$$

На основании приведенных уравнений и ограничений, определяемых физической реализуемостью системы и задающих допусковую область **P**, получено:

$$\xi_{\text{max}} = 0,591; \quad \xi_{\text{min}} = 0,761; \quad T_1 = kT_2; \quad T_1 = 1/4\xi^2; \quad k_{\text{max}} = 0,716; \quad k_{\text{min}} = 0,432; \quad T_{1\text{max}} = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$T_{1\text{min}} = 0,5T_{\mu} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad T_{2\text{min}} = 4\xi_{\text{max}}^2 T_1 = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ с},$$

где $T_{\mu} = 0,01$ А — заданное значение некомпенсированной постоянной времени, определяемой тиристорным преобразователем напряжения. Полученные уравнения и заданные ограничения определяют область работоспособности системы, которая приведена на рис. 3.

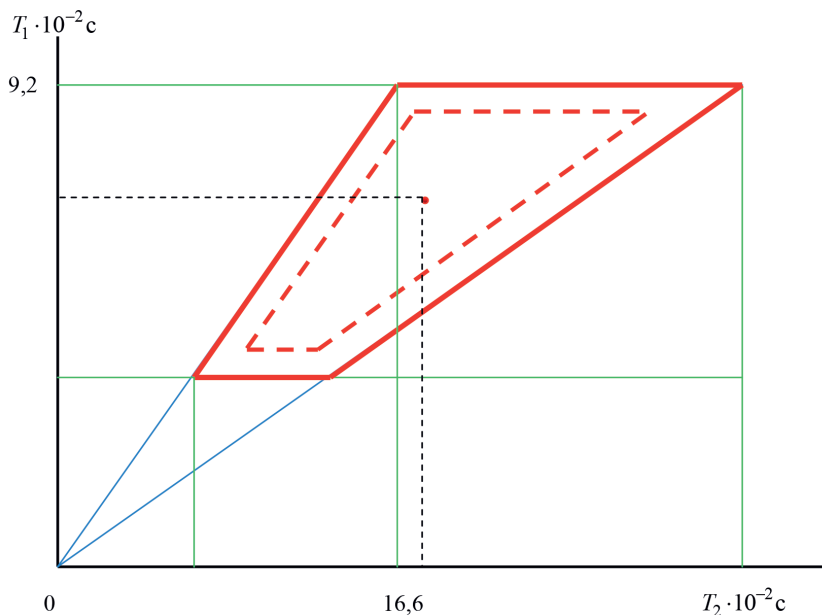


Рис. 3. Область работоспособности системы второго порядка

Последовательное сужение области работоспособности в направлении оптимума на основании метода сужающихся областей [16] позволило определить оптимальные значения параметров $T_1 = 0,92 \cdot 10^{-2}$ с; $T_2 = 1,66 \cdot 10^{-2}$ с. Отображение областей, полученных в процессе реализации алгоритма сужения области работоспособности в пространство контролируемых параметров Z_1 и Z_2 , позволило построить допусковые области, каждой из которых соответствует определенный запас работоспособности системы.

Для определения параметров регуляторов тока и скорости сопоставим АФЧХ разомкнутой цепи контуров тока и скорости с желаемой характеристикой $\omega_0 = 81 (1/c)$. С этой целью построим АФЧХ желаемой разомкнутой системы для некоторого фиксированного числа точек $\omega_k \in (0; \omega_0)$ при $\omega_0 = 81 (1/c)$

$$W_{\text{раз.жел}}(j\omega) = A(\omega_k) + jB(\omega_k); k = 1, 2, \dots, n_1,$$

где $A(\omega_k) = A_k = -T_1 T_2 \omega_k^2 / \left((T_1 T_2 \omega_k^2)^2 + (T_2 \omega_k)^2 \right)$; $B(\omega_k) = B_k = A_k / T_1 \omega_k$.

Рассмотрим структурную схему контура тока (рис. 4). Пусть частотная характеристика объекта контура тока сформирована и определена для тех же частот, что и желаемая характеристика:

$$W_{\text{об}}(j\omega_k) = K_T W_n(j\omega_k) / (Z_y(\omega_k) + Z_{\text{вн}}(\omega_k)) = C(\omega_k) + jD(\omega_k) = C_k + jD_k.$$

Предположим, что в контуре тока применен ПИ-регулятор с частотной характеристикой

$$W_{\text{РТ}}(j\omega) = K_{\text{РТ}} \frac{1 + T_{\text{РТ}}(j\omega)}{T_{\text{РТ}}(j\omega)} = K_{\text{РТ}} - j \frac{K_{\text{РТ}}}{T_{\text{РТ}}} \frac{1}{\omega} = X_1 - jX_2 \frac{1}{\omega},$$

где неизвестные параметры регулятора тока обозначены как $X_1 = K_{\text{РТ}}$; $X_2 = K_{\text{РТ}} / T_{\text{РТ}}$.

Тогда для разомкнутой цепи контура тока

$$W_{\text{разКТ}}(j\omega_k) = \left(X_1 - jX_2 \frac{1}{\omega_k} \right) (C_k + jD_k) = \left(C_k X_1 + \frac{D_k}{\omega_k} X_2 \right) + j \left(D_k X_1 - \frac{C_k}{\omega_k} X_2 \right).$$

Частотная характеристика разомкнутой цепи контура тока отличается от желаемой характеристики. Для конкретной частоты разность этих характеристик имеет следующий вид:

$$l_k = W_{\text{раз.жел}} - W_{\text{раз.КТ}} = \left(A_k - C_k X_1 - \frac{D_k}{\omega_k} X_2 \right) + j \left(B_k - D_k X_1 + \frac{C_k}{\omega_k} X_2 \right).$$

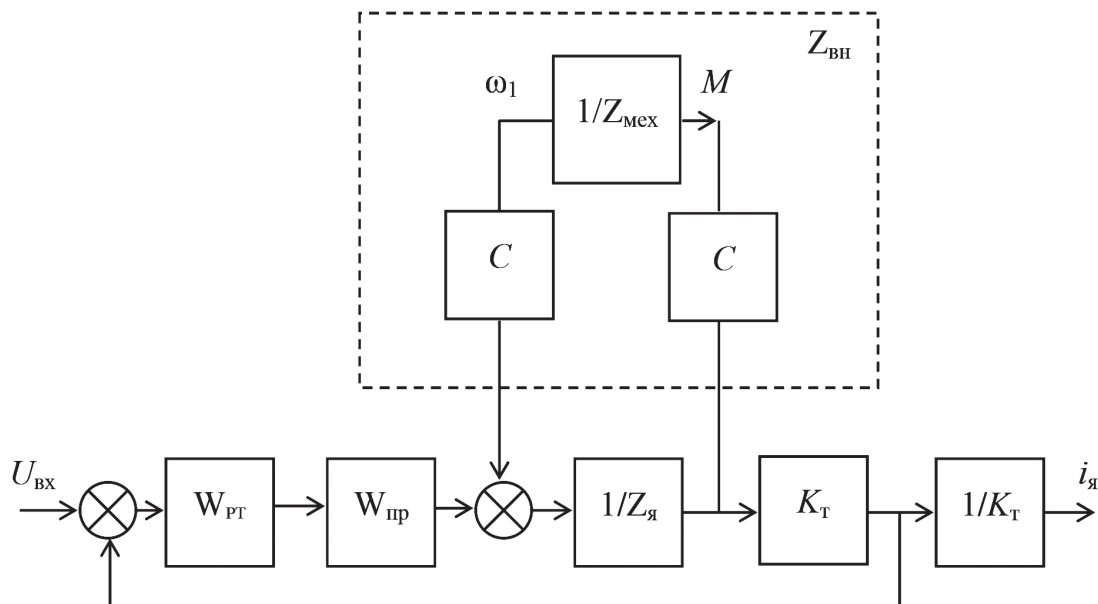


Рис. 4. Структурная схема контура тока

Для определения параметров регулятора тока воспользуемся методом наименьших квадратов. При этом сумма квадрата модуля разности $\Sigma |l_k|^2$, образованная в области существенных частот, должна быть наименьшей. Для этого найдем производные этой суммы по параметрам X_1 и X_2 и приравняем их к нулю:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sum_1^n |I_k|^2}{\partial X_1} &= -2 \sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k) + 2 \sum_1^n (C_k^2 + D_k^2) X_1 = 0; \\ \frac{\partial \sum_1^n |I_k|^2}{\partial X_2} &= 2 \sum_1^n (B_k C_k - A_k D_k) / \omega_k + 2 \sum_1^n ((C_k^2 + D_k^2) / \omega_k^2) X_2 = 0.\end{aligned}$$

Из полученной системы уравнений легко найти параметры X_1 и X_2 и тем самым определить параметры регулятора тока:

$$K_{PT} = X_1 = \frac{\sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k)}{\sum_1^n (C_k^2 + D_k^2)}; \quad T_{PT} = \frac{X_1}{X_2} = \frac{\sum_1^n (A_k C_k + B_k D_k)}{\sum_1^n (A_k D_k - B_k C_k) \omega_k}.$$

Зная параметры X_1 и X_2 , можно построить частотную характеристику разомкнутого и замкнутого контура тока, на основании которой строится переходный процесс в контуре тока. Аналогично настраивается и регулятор скорости. Для случая, когда область работоспособности аппроксимирована совокупностью линейных гиперплоскостей и известны статистические данные о законах распределения первичных параметров, для решения задачи можно воспользоваться методом пересчета исходной области работоспособности в пространство измеряемых (контролируемых) характеристик, изложенным в работе [21]. Допусковая область в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ также задается в виде линейно-зависимых допусков. Для решения задачи следует использовать рассмотренные в работе [12] методы касательных гиперплоскостей и линейной аппроксимации граничных точек.

Для отображения области $\mathbf{G}$ в область $\mathbf{F}$ достаточно определить линейный оператор $\mathbf{B}$ такого преобразования: $\mathbf{V} = \mathbf{Z} \mathbf{B}$, где $\mathbf{Z}$ — h -мерный вектор измеряемых характеристик; $\mathbf{V}$ — n -мерный вектор первичных параметров ЭТС с учетом ошибок линейного преобразования.

Требование линейности оператора $\mathbf{B}$ определяется необходимостью однозначного пересчета области работоспособности и получения в пространстве контролируемых параметров области с линейно-зависимыми допусками. Поставив рассмотренное преобразование в исходную систему линейных неравенств $\sum_{i=1}^n a_{ij} X_i + b_j \leq 0$, задающих область работоспособности в пространстве первичных параметров, получим допусковую область в пространстве контролируемых параметров в виде системы линейных неравенств:

$$\mathbf{aBZ} + \mathbf{b} \leq 0,$$

где $\mathbf{a}$ — матрица коэффициентов неравенств ($r \times n$), задающих область работоспособности; $\mathbf{B}$ — линейный оператор ($n \times h$).

В развернутом виде получим

$$\sum_{g=1}^h Z_g \sum_{i=1}^n a_{ki} B_{ig} + b_k \leq 0, k = \overline{1, r},$$

где B_{ig} — элементы оператора $\mathbf{B}$, h — количество измеряемых характеристик; n — число первичных параметров; r — число неравенств, задающих допусковую область $\mathbf{F}$.

Задание линейного оператора определяется из условия наилучшего приближения вектора $\mathbf{V}$ к вектору параметров $\mathbf{X}$. В качестве оценки степени соответствия этих векторов используется ковариационная матрица ошибки преобразования $\mathbf{R}_\epsilon$.

Оценка методической погрешности при контроле состояния электротехнических систем

Важнейшим показателем контроля состояния ЭТС является достоверность принятия решения по результатам выполненных измерений [8]. Достоверность контроля определяется

погрешностями двух видов: инструментальной и методической. Если способы определения инструментальной погрешности рассмотрены весьма полно, то вопросы оценки методической погрешности, а также возможные пути ее снижения разработаны недостаточно. При аппроксимации реальной границы области работоспособности появляется риск заказчика или риск изготовителя, которые определяют методическую составляющую погрешности [6], [8]. Кроме того, в работах [3], [6] доказано, что при назначении независимых допусков на входные параметры системы методическая погрешность может достигать больших величин. Вместе с тем численные оценки такой аппроксимации нигде подробно не рассматривались. Таким образом, ставится задача разработки методики расчета методической погрешности, на основании которой может быть сделан вывод о возможности или невозможности контроля ЭТС по независимым допускам.

Методика предполагает вычисление оценки методической погрешности $\hat{\mu}$ по формуле

$$\hat{\mu} = |1 - \gamma(V_1/V_2)|, \quad (4)$$

где V_1 и V_2 — объемы областей S_B и G или G и S_0 соответственно, γ — коэффициент, величина которого определяется плотностью вероятности вектора первичных параметров, а также конфигурацией и взаимным расположением областей S и G относительно друг друга [6].

При этом на первом этапе вычисляется отношение объемов V_1/V_2 и для коэффициента $\gamma = 1$ приближенно оценивается значение μ . На втором этапе, в случае его необходимости, определяется значение коэффициента γ и полученная оценка величины μ уточняется. Рассмотрим особенности вычисления относительной величины методической погрешности по формуле (4).

Для построения бруса $S_B(N_B)$ и вычисления его объема разработаны специальные методы [22]. Недостатком этих методов является то, что они применимы лишь в случае, когда область работоспособности является односвязной и выпуклой. Для произвольного случая построить брус можно по рассмотренному в работе [6] алгоритму, предусматривающему наличие информации о границе области работоспособности.

Для построения описанного бруса $S_0(N_0)$ предлагается следующий алгоритм. Из массива граничных точек области работоспособности по каждому первичному параметру $X_i, i = \overline{1, n}$ выделяют точки, соответствующие его максимальному $X_{i\max}$ и минимальному $X_{i\min}$ значениям. В частном случае, когда граница области работоспособности примыкает к граням допусковой области $D_x(P)$, для отдельных параметров могут выполняться равенства $X'_{i\min} = X_{i\min}$ и $X'_{i\max} = X_{i\max}$. Точки, соответствующие $X'_{i\min}$ и $X'_{i\max}$, определяются в процессе построения границы области работоспособности. Грани бруса N_0 описываются уравнениями $X_i = X'_{i\min}$, $X_i = X'_{i\max}$, $i = \overline{1, n}$, а его объем V_2 вычисляется по формуле $V_2 = \prod_{i=1}^n (X_{i\max} - X_{i\min})$.

Объем области работоспособности может быть вычислен точно, при наличии информации о ее границе, и приближенно, при отсутствии такой информации. Рассмотрим приближенные способы вычисления ее объема, которые более удобны для практики. Классическим подходом к решению этой задачи является использование специальных кубатурных формул, основанных на приближенном вычислении n -кратного определенного интеграла. В работе [3] показано, что в этом случае нужно использовать аналитическое описание области работоспособности [6], [12]. При большом числе контролируемых параметров объем области работоспособности следует вычислять, используя метод статистических испытаний, где в качестве расчетных используются квазислучайные точки, составляющие ЛПт-последовательности [23].

Для некоторых ЭТС возможно вычисление коэффициента γ на стадии производства. При этом случайным образом формируется выборка N объектов из их общего числа, составляющих серию. Априорно или в результате специально проведенных испытаний определяется число работоспособных объектов N_1 и вычисляется относительная частота $\alpha_1 = N_1/V_1$. Действительное число рабо-

тоспособных объектов определяется на основании уравнения (1), путем подсчета числа объектов, вектор контролируемых параметров которых принадлежит области работоспособности. При этом относительная частота $\alpha_2 = N_2/V_2$. Коэффициент γ вычисляется как отношение α_1/α_2 . Для вычисления коэффициента γ на стадии эксплуатации необходимо иметь информацию о границе области работоспособности и статистические данные о траектории изменения вектора параметров $\mathbf{X}$ в области $\mathbf{P}$. На основании этих данных определяются моменты времени t_1 и t_2 , для которых относительно начального момента времени t_0 имеет место пересечение траектории движения вектора $\mathbf{X}$ границ областей $\mathbf{N}_0$ и $\mathbf{G}$ соответственно. Далее вычисляются относительные частоты $\alpha_1 = t_1/N_0$, $\alpha_2 = t_2/G$ и коэффициент $\gamma = \alpha_1/\alpha_2$.

Пример. Пусть ЭТС характеризуется двумя контролируемыми параметрами: X_1 и X_2 , с равномерным распределением плотности вероятности и тремя показателями качества: $Y_1 \leq 1$; $Y_2 \leq 10$; $Y_3 \geq 3$. Экспериментальным путем были установлены зависимости, связывающие первичные параметры с показателями качества:

$$Y_1 = 8,25X_1 + 6X_2 + 7,5X_1X_2 - 1,4; \quad Y_2 = 11,83X_1 + 17,52X_2 + 7,3X_1X_2 - 2;$$

$$Y_3 = 2,72X_1 + 0,89X_2 + 0,99X_1X_2 - 2,96.$$

Параметры X_1 и X_2 представлены в уравнениях в относительных единицах. Ограничения на их значения определяют допусковую область $\mathbf{P}$: $|X_1| \leq 1$, $|X_2| \leq 1$.

Используя метод аналитического описания области работоспособности [6], [14], окончательно получим:

$$G = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} 14,36 - 17,36X_1 + 13,41X_2 - 13,81X_1X_2 - | -9,6 + 3,58X_1 - 23,52X_2 - 0,2X_1X_2 | - \\ - | 1,96 + 2,72X_1 - 0,11X_2 + 0,99X_1X_2 | - \left| \begin{array}{l} 14,44 - 22,8X_1 - 9,63X_2 - 15,79X_1X_2 - \\ - | -9,6 + 3,58X_1 - 23,52X_2 - 0,2X_1X_2 | + \\ + | 1,96 + 2,72X_1 - 0,11X_2 + 0,99X_1X_2 | \end{array} \right| \end{array} \right].$$

Граничные точки области работоспособности определялись методом параллельных прямых [6]. Для выбранного шага дискретизации $\Delta X_1 = 0,1$ были определены наибольшее и наименьшее значения первичных параметров, а также площадь S_0 прямоугольника N_0 : $X'_{1,O\max} = 0,7$; $X'_{1,O\min} = -0,5$; $X'_{2,O\max} = 1$; $X'_{2,O\min} = -0,74$; $S_0 \approx 2,09$. Методом диагоналей [1] были определены координаты прямоугольника N_g максимально возможной площади S_B : $X'_{1,B\max} = 0,2$; $X'_{1,B\min} = -0,2$; $X'_{2,B\max} = 0,1$; $X'_{2,B\min} = -0,6$; $S_B = 0,28$.

Вычислим площадь S области работоспособности $\mathbf{G}$. Сделаем это двумя способами, точно — по известным граничным точкам, и приближенно — используя метод статистического моделирования.

$$S \approx 0,5 \sum_{k=1}^h (q_{i+1} - q'_{i+1} + q_i - q'_i) \Delta X_1 = 0,89,$$

где q_{i+1} , q'_{i+1} , q_i , q'_i — граничные точки области $\mathbf{G}$, соответственно для i -го и $(i+1)$ -го сечений; $S \approx 4d_1/d_2 = 0,88$, где d_1 и d_2 — число квазислучайных точек, принадлежащих, соответственно, областям $\mathbf{G}$ и $\mathbf{P}$.

На рис. 5 показана граница области работоспособности, аппроксимирующие ее вписанный N_g и описанный N_0 прямоугольники и построенная ЛПТ последовательность квазислучайных точек при их общем числе $d_2 = 32$. На основании формулы (4) методическая погрешность, определяющая риск заказчика, равна 57 %, а риск изготовителя — 68 %. Относительная погрешность вычисления площади области работоспособности методом статистического моделирования не превышает 1,2 %.

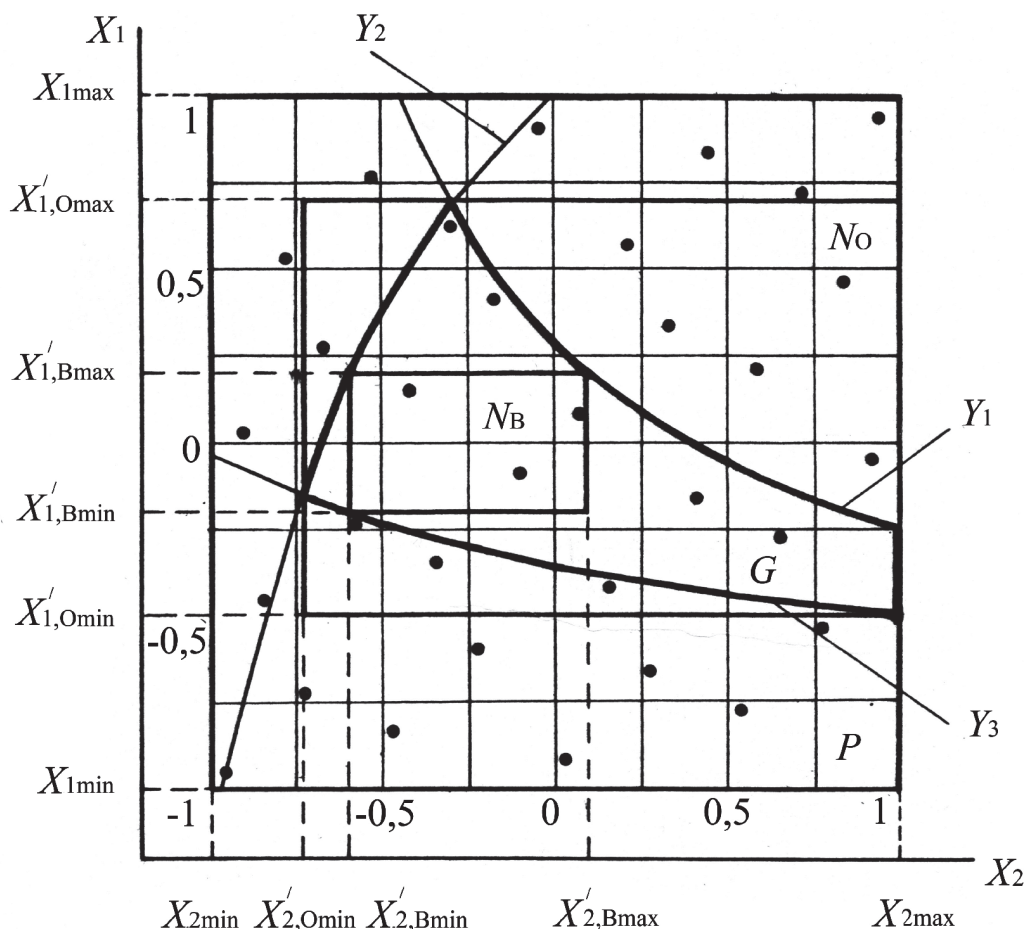


Рис. 5. Иллюстрация процесса вычисления методической погрешности

Для ЭТС, имеющих блочную структуру, для оценки их состояния и определения запаса работоспособности следует дополнительно к рассмотренным алгоритмам использовать специальную процедуру спиральной развертки, рассмотренную в работе [7].

Выводы

1. Изложенные в работе метод и алгоритмы контроля состояния электротехнических систем, в отличие от известных методов, позволяют эффективно и с высокой достоверностью в режиме онлайн не только распознавать работоспособное и неработоспособное состояния системы в процессе эксплуатации, но и оценивать ее запас работоспособности. Метод основан на использовании информации о границе области работоспособности и отображении её в пространстве измеряемых характеристик системы.

2. Методическая погрешность контроля состояния электротехнических систем в процессе эксплуатации может быть вычислена при помощи рассмотренной в статье методики, которая предусматривает использование метода статистических испытаний и аналитическое описание области работоспособности системы. С целью повышения эффективности методики при реализации статистических испытаний применяется процедура формирования квазислучайных точек, составляющих ЛПт-последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

2. Калявин В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. — СПб.: Элмор, 2009. — 336 с.
3. Саушев А. В. Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем / А. В. Саушев // Информатика и системы управления. — 2012. — № 3 (33). — С. 120–131.
4. Портнягин Н. Н. Применение метода исключения варьируемого параметра при решении задач диагностики / Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке. — М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2009. — 165 с.
5. Пюкке Г. А. Стохастические модели и методы анализа работоспособности объектов судового электрооборудования / Г. А. Пюкке, С. О. Федоров // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2013. — № 26. — С. 28–38.
6. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
7. Саушев А. В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156.
8. Катueva Я. В. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катueva, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
9. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем / Л. Г. Евланов. — М.: Наука, 1979. — 432 с.
10. Иншаков А. Н. Допусковый анализ при проектировании сложных технических систем / А. Н. Иншаков, С. А. Иншаков // Информационные технологии. — 1997. — № 1. — С. 34–39.
11. Шило Г. Н. Назначение интервальных допусков методом отображений / Г. Н. Шило // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2009. — Т. 52. — № 5. — С. 24–34.
12. Саушев А. В. Методы линейной аппроксимации граничных точек областей работоспособности технических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 41–51.
13. Saushev A. B. Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range / A. B. Saushev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2013. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.
14. Саушев А. В. Математическое описание областей работоспособности электромеханических систем / А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 6. — С. 7–13.
15. Саушев А. В. Отображение статических и динамических свойств электротехнических систем полиномиальными функциями / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 54а–62.
16. Саушев А. В. Метод и алгоритмы параметрического синтеза электротехнических систем по критерию запаса работоспособности / А. В. Саушев // Информационные технологии. — 2012. — № 12. — С. 24–29.
17. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
18. Абрамов О. В. Выбор минимальной совокупности настроечных параметров / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2015. — № 2 (44). — С. 23–32.
19. Саушев А. В. Синтез настраиваемых электротехнических систем / А. В. Саушев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 46–56.
20. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О. П. Михайлов. — М.: Машиностроение, 1990. — 304 с.
21. Дятлов В. А. Контроль динамических систем / В. А. Дятлов, А. Н. Кабанов, Л. Т. Милов. — Л.: Энергия, 1978. — 88 с. — (Библиотека по автоматике; вып. 592, б).
22. Абрамов О. В. Параметрическая коррекция систем управления / О. В. Абрамов, Ф. И. Бернацкий, В. В. Здор. — М.: Энергоиздат, 1982. — 175 с.
23. Антонова Г. М. Сеточные методы равномерного зондирования для исследования и оптимизации динамических стохастических систем / Г. М. Антонова. — М.: Физматлит, 2007. — 224 с.

METHOD OF CONDITION MONITORING OF ELECTRICAL SYSTEMS MEASURED CHARACTERISTICS OF TEST DIAGNOSTICS

Article is devoted to the solution of one of the most important tasks of the technical diagnostics of electrotechnical systems devoted to determination of their condition in the course of adjustment and operation.

Diagnostic parameters are output parameters of system in the mode of its test diagnosing. It is shown that information on border of area of working capacity is necessary for assessment of a condition of system and determination of its inventory of working capacity. Three main methods of approximation of area of working capacity are allocated and are considered. The essence of a method of control of a condition of electrotechnical systems according to their output characteristics reveals. Possible methods of a task of area of working capacity are analyzed. Algorithms of display of area of working capacity and others the dopuskovykh of areas from space of parameters of the completing system elements are given to space of its days off, the measured characteristics. For the purpose of display of areas from space of internal parameters of system in space of its output parameters use of the factorial models created on the basis of an experiment planning method is offered. Rules of recognition of accessory or not accessory of a vector of actual state of system of its area of working capacity are received, and also to dopuskovy areas which characterize specific values of an inventory of operability of system and are determined by a form of its task. For the electrotechnical systems having an appearance of management systems the alternative method of receipt of the equations of the hypersurfaces limiting area of working capacity, based on creation of the desirable frequency characteristic is considered. The example of synthesis of a management system of the electric drive of a direct current with subordinate regulation of coordinates is given. For a case when the area of working capacity is approximated by set of linear hyperplanes and statistical data on the distribution laws of primary parameters of system are known, the statistical method of recalculation of initial area of working capacity in space of the measured (controlled) characteristics is considered. The technique of assessment of a methodical error of determination of a condition of electrotechnical systems based on a method of statistical modeling and use of LPt sequences on the basis of which the set of pseudorandom points is created is stated. The offered technique is illustrated by an example.

Keywords: electrical system, the area of health status monitoring, performance margin, diagnostic parameters.

REFERENCES

1. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelektrotehnicheskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
2. Kaljavin, V. P., and L. M. Rybakov. *Nadezhnost i diagnostika jelementov jelektroustanovok*. SPb.: Jelmor, 2009.
3. Saushev, A. V. "Analytical method of tolerancing for parameters of dynamic systems." *Information Science and Control Systems* 3(33) (2012): 120–131.
4. Portnjagin, N. N., and G. A. Pjukke. *Primenenie metoda iskljuchenija variruemogo parametra pri reshenii zadach diagnostirovanija*. M.: Iz-vo «Akademija Estestvo-znaniya», 2009.
5. Pjukke, G. A., and S. O. Fedorov. "Stochastic models and operability analysis of ship electrical equipment units." *Bulletin of Kamchatka State Technical University* 26 (2013): 28–38.
6. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskikh sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.
7. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. "Diagnosing of the condition of electrotechnical systems in space of parameters of their elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 143–156.
8. Katueva, Ya. V., and D. A. Nazarov. "The Methods of Parametric Synthesis Based on Grid Representation of a Region of Acceptability." *Information Technologies* 21.9 (2015): 651–656.
9. Evlanov, L. G. *Kontrol dinamicheskikh sistem*. M.: Nauka, 1979.
10. Inshakov, A. N., and S. A. Inshakov. "Dopuskovyj analiz pri proektirovanii slozhnyh tehicheskikh system." *Information Technologies* 1 (1997): 34–39.
11. Shilo, G. N. "Naznachenie intervalnyh dopuskov metodom otobrazhenij." *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika* 52.5 (2009): 24–34.
12. Saushev, A. V. "Methods of linear approximation of boundary points of areas of operability of technical systems." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3(19) (2013): 41–51.
13. Saushev, A. V. "Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range." *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 49.1 (2013): 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.
14. Saushev, A. V. "The Mathematical Description of Areas of Working Capacity of Electromechanical Systems." *Mechatronics, Automation, Control* 6 (2013): 7–13.
15. Saushev, A. V. "Display of static and dynamic properties of electrotechnical systems by polynomial functions." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2012): 54a–62.

16. Saushev, A. V. "Method and algorithms of parametrical synthesis of electrotechnical systems by criterion of a stock of working capacity." *Information Technologies* 12 (2012): 24–29.
17. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admissions of multiple parameter systems." *Informacionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy* 3 (2015): 65–73.
18. Abramov, O. V. "Selection of the minimum set of adjusting parameters." *Information Science and Control Systems* 2 (44) (2015): 23–32.
19. Saushev, A. V. "Synthesis of adjusted electrotechnical systems." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikacij* 4 (2012): 46–56.
20. Mihajlov, O. P. *Avtomatizirovannyj jelektroprivod stankov i promyshlennykh robotov*. M.: Mashinostroenie, 1990.
21. Djatlov, V. A., A. N. Kabanov, and L. T. Milov. *Kontrol dinamicheskikh sistem*. L.: Jenergiya, 1978.
22. Abramov, O. V., F. I. Bernackij, and V. V. Zdor. *Parametricheskaja korrekciya sistem upravlenija*. M.: Jenergoizdat, 1982.
23. Antonova, G. M. *Setochnye metody ravnomernogo zondirovaniya dlja issledovaniya i optimizacii dinamicheskikh stohasticheskikh sistem*. M.: Fizmatlit, 2007.

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
Гаспарян Каджик Корюнович — аспирант.
Научный руководитель:
Саушев Александр Васильевич.
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
Gasparjan Kadzhik Korjunovich — postgraduate.
Supervisor:
Saushev Aleksandr Vasil'evich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 октября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-184-205
УДК 621.396

**А. Н. Маринич,
А. В. Припотнюк,
Ю. М. Устинов**

МОНИТОРИНГ СУДОВ НА ТРАССАХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В статье рассматривается возможность использования спутниковых систем связи для целей мониторинга судов в высоких широтах. Показано, что возрастающая роль Арктики в экономике обуславливает необходимость надежной и бесперебойной связи контроля положения судов. Приводятся проблемы, стоящие перед традиционной высокочастотной связью в высоких широтах. Высказывается предположение о необходимости использования спутниковой связи, альтернативной системе ИНМАРСАТ. Показано, что текущее состояние систем мониторинга основывается на возможностях системы ВИКТОРИЯ с использованием систем связи ИНМАРСАТ и АРГОС. Проводится общая оценка спутниковых низкоорбитальных и среднеорбитальных систем связи с круговыми орбитами для решения задач мониторинга. Срав-

ниваются возможности систем по энергетике, зоне охвата, количеству спутников в системе, пропускной способности и времени контакта. Анализируются характеристики низкоорбитальных спутниковых систем ИРИДИУМ, ГЛОБАЛСТАР, ОРБКОММ, АРГОС, TELEDESIC, CELESTRI, отечественных систем РОСТЕЛЕСАТ, СИГНАЛ, ГОНЕЦ, КУРС, среднеорбитальных систем ОДИССЕЙ и АЙКО. Рассмотрены характеристики и внешний вид терминалов систем, приводятся материалы по использованию направленных зональных лучей, особенностям обмена информацией со спутниками и при межспутниковом обмене в некоторых случаях. На основании анализа дана сравнительная таблица характеристик систем связи. Сформулировано заключение о возможности использовании систем для целей мониторинга либо постоянно, либо по расписанию. Предложено использовать спутниковые системы АРГОС, КУРС, ОРБКОММ и ГОНЕЦ как альтернативные системы для мониторинга судов в Арктике и на трассах Северного морского пути в связи с невозможностью использования системы ИНМАРСАТ.

Ключевые слова: спутниковая связь, мониторинг, Северный морской путь, терминалы, зональные лучи, центр мониторинга.

Актуальность задачи связи и мониторинга судов в северных широтах

Согласно прогнозам экспертов, через пятьдесят лет Арктика может стать одним из основных источников энергоресурсов и ключевым транспортным узлом планеты. Согласно официальной статистике, этот регион уже сегодня обеспечивает 11 % национального дохода России и 22 % объема ее экспорта. Здесь добывается никель и кобальт, медь, платиноиды, сконцентрирована добыча нефти и газа. В условиях глобального потепления ожидается таяние льдов и удешевление добычи природных ресурсов. Ожидается, что к 2050 г. Северный морской путь (СМП) будет открыт сто дней в году вместо двадцати.

Штокмановское газоконденсатное месторождение — одно из крупнейших месторождений в мире (рис. 1) — открыто в 1988 г. сотрудниками производственного объединения «Арктикморнефтегазразведка» (г. Мурманск) на судне ледового класса «Валентин Шашин». Месторождение расположено в центральной части шельфа российского сектора Баренцева моря в 600 км к северо-востоку от Мурманска. Разведанные запасы (2006 г) составляют 3,7 трлн м³ газа и 31 млн т конденсата.



Рис. 1. Схема транспортировки газоконденсатного сырья Штокмановского месторождения

С 2001 г. ведутся споры о признании российской зоной сектора Арктики с входящим в нее подводным хребтом Ломоносова, который пересекает весь Ледовитый океан — от Канады до России через Северный полюс. На рис. 2 красным цветом выделена площадь континентального шельфа в Северном Ледовитом океане за пределами 200-мильной зоны, на которую претендует Россия. Эта площадь равна 1,2 млн кв. км.

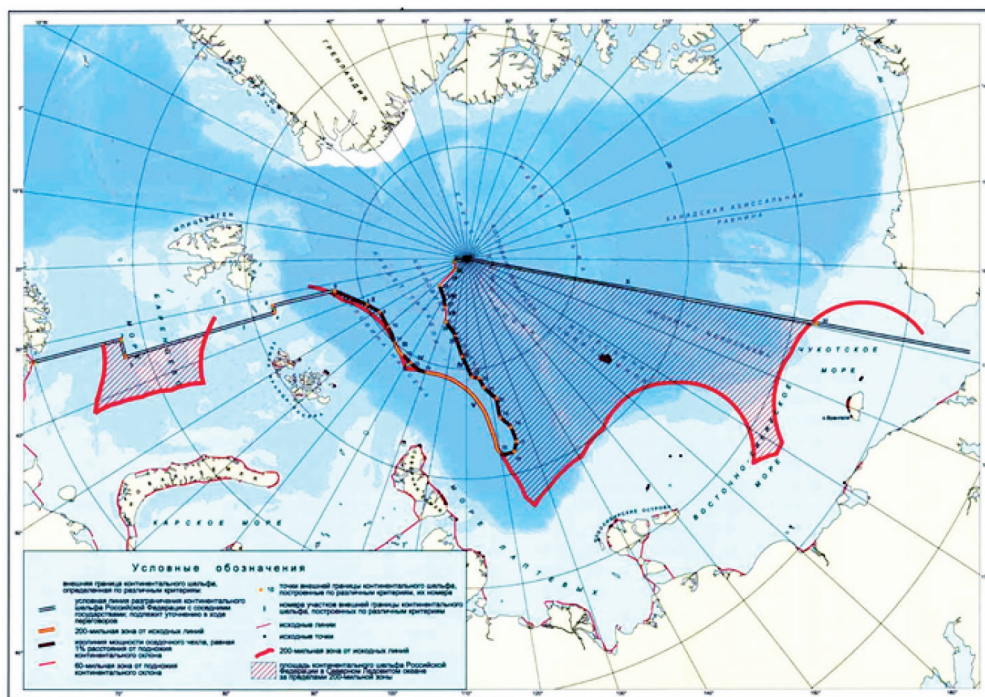


Рис. 2. Площадь континентального шельфа Российской Федерации в Арктике

СМП — судоходная магистраль, которая проходит вдоль северных берегов морей Северного Ледовитого океана и соединяет европейские и дальневосточные российские порты, а также устья судоходных сибирских рек в единую общесоюзную транспортную систему (рис. 3).



Рис. 3. Трасса СМП

Путь от Санкт-Петербурга до Владивостока по СМП равен 14280 км, от Санкт-Петербурга до Владивостока через Суэцкий канал — 23200 км, а вокруг мыса Доброй Надежды — 29400 км.

На рис. 4 сплошной жирной линией со стрелками показаны трассы канадского Северо-Западного пути, который открывает широкие возможности для транспортировки грузов между востоком и западом.

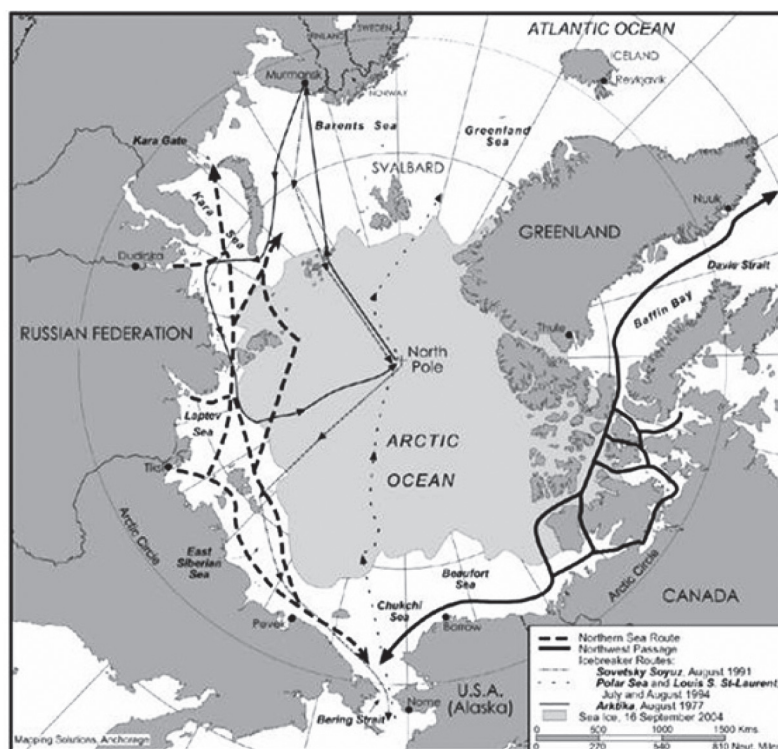


Рис. 4. Трассы СМП и Северо-Западного пути

Учитывая значимость Арктики и СМП для России и мирового сообщества, необходима надёжная и оперативная связь между судами различного назначения. Задачи связи и автоматизированного мониторинга судов решаются с помощью центров связи и мониторинга. Так, в 2000 г. создан глобальный национальный центр автоматизированной системы мониторинга и связи с судами «Виктория» для контроля за местоположением российских морских судов и судов смешанного плавания (*река – море*). Данные мониторинга передаются в Международный центр дальней идентификации и контроля местоположения судов (LRIT — Long-Range Identification and Tracing of ships) в Лондоне [1]. В 2008 г. в Москве создан центр системы мониторинга рыболовства и связи для обеспечения мониторинга водных биоресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью рыбопромысловых судов, а также развития и функционирования береговых объектов ГМССБ. Центр системы создан на базе действующих региональных центров мониторинга в г. Мурманске (1998 г.) и г. Петропавловске-Камчатском (1999 г.) [2].

Работа национального центра «Виктория» основана на получении данных по системе ИНМАРСАТ с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ- D+. Мурманский и Камчатский региональные центры решают задачи мониторинга на основе данных приёмников ГНСС, терминалов ИНМАРСАТ-С и спутниковой системы электронного документооборота АРГОС. Задача расширения зоны мониторинга усложняется из-за невозможности работы спутниковой системы ИНМАРСАТ на широтах более 70° (в морском районе А4).

Практика работы со спутниковыми системами показала, что надёжный приём сигналов спутников возможен, если они видны под углом не менее 10°. Это положение касается не только терминалов спутниковых систем связи, но и приемников спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Для замены системы ИНМАРСАТ на судах в морском районе А4 в качестве обязательного оборудования установлены радиостанции, работающие в ВЧ-диапазоне. Однако использование их для целей автоматизированного мониторинга связано с рядом трудностей:

- сложность выбора частотного канала связи;
- низкая скорость передачи данных, не превышающая 100 бит/с;
- высокий уровень импульсных помех: атмосферных, промышленных, контактных;

- высокий уровень взаимных помех в выбранном канале связи;
- высокий уровень замираний сигнала;
- возможность полного отсутствия связи на северных широтах при мощных вспышках на Солнце, особенно во время одиннадцатилетних пиков солнечной активности.

С учётом этого ВЧ-связь и мониторинг по сравнению со спутниковой связью и мониторингом проигрывают последнему по оперативности и надёжности [3]. При сопоставлении отечественных и зарубежных систем следует принимать во внимание, что средства, выделяемые на эксплуатацию центров мониторинга в настоящее время, в основном (более 70 %) уходят на оплату трафика иностранных спутниковых систем.

Общая оценка спутниковых низкоорбитальных и среднеорбитальных систем связи с круговыми орбитами для решения задач мониторинга

Задача связи и мониторинга судов в северных широтах может быть решена с помощью низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых систем связи. Низкоорбитальные спутниковые системы связи используют спутники, высота круговых орбит которых лежит в пределах 700 – 1500 км, высота круговых орбит спутников среднеорбитальных систем расположена на высоте около 10000 км. Работе спутниковых систем в высоких широтах мешают пояса радиации Ван-Аллена на высотах 1,6 – 5,0 тыс. км и 13,0 – 19,0 тыс. км.

Многие действующие спутниковые системы на наклонных орбитах в пределах 45 – 50° не являются глобальными, для этого требуются спутники с большими наклонами орбит. Доказано, что для того чтобы система связи была глобальной при конечной пропускной способности, необходимо использовать сорок восемь низкоорбитальных спутников в четырех – восьми плоскостях. В среднеорбитальных спутниковых системах связи и мониторинга при той же зоне покрытия поверхности Земли необходимо меньшее число спутников при большей мощности передатчиков. Для систем, работающих в режиме телефонии, обязательна непрерывность, для мониторинга непрерывность необязательна, число узловых наземных станций может быть значительно уменьшено. Число узловых станций для глобальной низкоорбитальной системы должно быть 152 – 210, а для глобальной среднеорбитальной системы — в 2 – 3 раза меньше.

Для увеличения пропускной способности спутниковых систем связи используются методы многостанционного доступа: TDMA, FDMA, CDMA. Высокая скорость передачи данных достигается с помощью фазированных антенных решёток или зеркальных антенн, установленных на спутниках. В подспутниковой зоне видимости формируется не одна, а несколько зон с высокими энергетическими характеристиками [4]. В системе с непрерывной связью запрос данных мониторинга может производиться из центра мониторинга в любое время, в системах с прерывной связью данные мониторинга передаются по расписанию [5].

Низкоорбитальные спутниковые системы с высотой орбит $h_1 = 700 - 1500$ км обладают лучшими энергетическими характеристиками, чем среднеорбитальные системы с высотой орбит $h_2 = 5000 - 13000$ км, так как потеря мощности сигналов при распространении радиоволн возрастает в $\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$ раз. Вместе с тем технический ресурс низкоорбитальных систем меньше. Так, если

период обращения спутников составляет 100 мин, то в среднем 30 мин они находятся на теневой стороне Земли. Соответственно солнечные и аккумуляторные батареи должны обеспечивать приблизительно 5000 циклов зарядки / разрядки в год, поэтому технический ресурс спутников низкоорбитальных систем, как правило, не превышает 5 – 7,5 лет. Период обращения среднеорбитальных спутников составляет около 6 ч, из которых они находятся в зоне тени лишь несколько минут. Технический ресурс среднеорбитальных спутников достигает 12 – 15 лет.

Для низкоорбитальной системы ИРИДИУМ средняя продолжительность видимости спутника составляет 6 мин, для ГЛОБАЛСТАР — 7 мин, для среднеорбитальных спутников с высотой орбит 10000 км — 50 мин [6] – [8].

Низко- и среднеорбитальные системы связи на круговых орбитах для решения задачи мониторинга

Глобальная спутниковая низкоорбитальная система связи и мониторинга ИРИДИУМ.

Глобальная спутниковая низкоорбитальная система ИРИДИУМ (MOTOROLA, США) (ныне IRIDIUM SATELLITE LLC), которая была создана в 1998 г., является первой в мире системой мобильной спутниковой связи. Она обеспечивает работу в режимах дуплексной телефонии, ФАКС, передачи данных и имеет доступ к сетям сотовой связи и к сети Интернет [9].

Орбитальная группировка состоит из шестидесяти шести основных и шести резервных спутников, равномерно размещенных на шести приполярных орбитах (рис. 5).

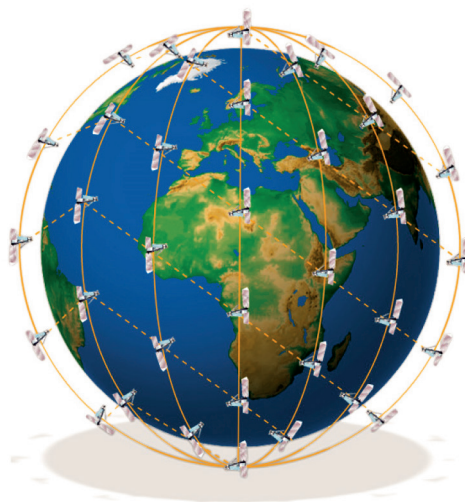


Рис. 5. Структура орбитальной группировки системы ИРИДИУМ

Наклонение орбит спутников — $86,4^\circ$, высота орбит — 780 км, период обращения вокруг Земли — 100,28 мин. Масса спутника составляет примерно 700 кг.

В состав наземного сегмента входят:

- центр управления системой (ЦУС);
- сети узловых наземных станций сопряжения (УЗС);
- посты слежения за спутниками и передачи данных в ЦУС.

ЦУС расположен в США, резервный ЦУС — в Италии. УЗС расположены во многих странах мира. В России размещены три УЗС: в г. Москве, г. Геленджике и г. Ижевске.

В системе применяется уникальная технология межспутниковой связи, при которой сообщения, принятые на спутнике от абонента, передаются от одного спутника другому, пока не достигнут того места, где находится вызываемый абонент. Благодаря межспутниковой связи, глобальность системы обеспечивается при ограниченном числе УЗС [10].

Увеличение мощности сигнала в месте приема достигается путем формирования сорока восьми зональных лучей с помощью антенн с фазированными решетками, установленными на каждом спутнике. Один луч высвечивает на поверхности Земли зону диаметром 600 км, в совокупности сорок восемь лучей формируют зону диаметром 4000 км.

Диапазон занимаемых частот системой составляет 1621,35 – 1626,50 МГц ($\lambda \approx 18$ см). Разделение сигналов при многостанционном доступе производится методом многостационарного доступа с временным разделением — МДВР (TDMA). Максимальная скорость передачи данных «вверх» — 180 кбит/с, «вниз» — 400 кбит/с. В режиме телефонии скорость передачи 64 кбит/с, в режиме ФАКС — 4,8 кбит/с, в режиме передачи данных — 134 кбит/с. Максимальная пропускная способность системы — 172000 дуплексных телефонных каналов. Тариф за телефонные переговоры лежит в пределах 0,7 – 1,4 долл./мин, стоимость мобильных телефонов — 1800 – 2000 долл.

На рис. 6 приведена комплектация судового терминала, который производит фирма EUROCOM INDUSTRIES.



Рис. 6. Внешний вид судового терминала фирма EUROCOM INDUSTRIES

На рис. 7 показан внешний вид мобильного терминала DeLORME inReach для передачи коротких текстовых сообщений и данных мониторинга.



Рис. 7. Внешний вид мобильного терминала DeLORME inReach

С 2014 г. начался запуск спутников второго поколения IRIDIUM NEXT. С окончанием развертывания системы в 2017 г. скорость передачи данных возрастет до 1 Мбит/с [11]. Ожидается, что число абонентов системы в 2017 г. достигнет трех миллионов.

Глобальная низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга ГЛОБАЛСТАР. Низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга ГЛОБАЛСТАР (США) разработана Международным консорциумом GLOBALSTAR L.H. на базе корпорации LORAL SPACE and COMMUNICATIONS (Нью-Йорк) и компании QUAICOMM (Сан-Диего) и эксплуатируется с 2001 г. ГЛОБАЛСТАР обеспечивает пользователей телефонной связью, передачей данных, мониторингом, доступом в сеть Интернет. Передача данных ведётся со скоростью 9,6 кбит/с, определение координат объектов для целей мониторинга производится доплеровским методом или с помощью приёмников ГНСС.

ГЛОБАЛСТАР с учетом действующих УНС обеспечивает услугами территорию земного шара от 70° ю. ш. до 70° с. ш. В Российский наземный сегмент входят три УНС, расположенные в г. Москве, г. Новосибирске и г. Хабаровске. На рис. 8 приведена карта, на которой показана территория с гарантированным качеством обслуживания системы. Расширение рабочей зоны на территории России возможно путём увеличения числа УНС.

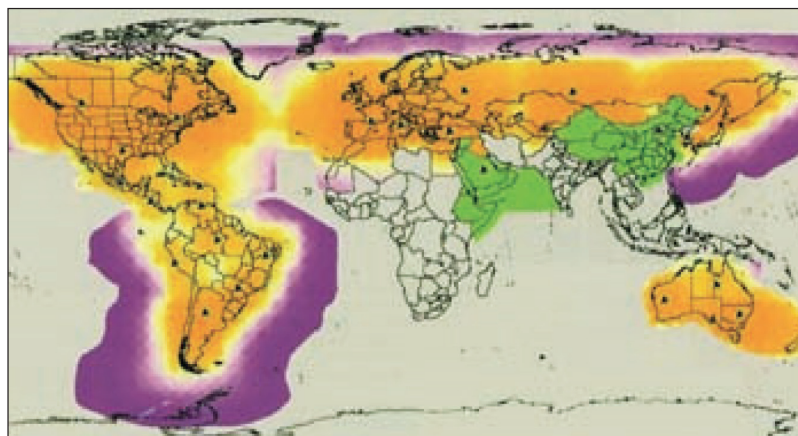


Рис. 8. Территория обслуживания системы ГЛОБАЛСТАР

Орбитальная группировка спутников ГЛОБАЛСТАР состоит из 48 рабочих и четырех резервных спутников. Высота орбит спутников — 1414 км, число орбит — восемь, наклонение орбит — 52° , число рабочих спутников на одной орбите — шесть, период обращения спутников вокруг Земли — 113 мин, излучаемая мощность — 1100 Вт, масса спутника — 450 кг. Орбитальная группировка обеспечивает видимость не менее трех спутников в обслуживаемой зоне (рис. 9).

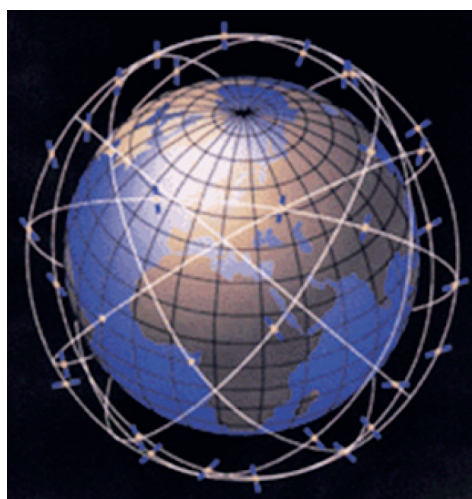


Рис. 9. Структура орбитальной группировки системы ГЛОБАЛСТАР

Текущая зона обслуживания одним спутником на поверхности Земли представляет собой круг диаметром 7780 км при угле места спутника $\beta = 0^\circ$, при $\beta = 5^\circ$ диаметр круга равен 6670 км, площадь зоны — $35 \times 10^6 \text{ км}^2$. Каждый спутник с помощью фазированной решётки формирует шестнадцать зональных лучей (рис. 10). Диаметр формируемого пятна — 1920 км, площадь — $2,9 \times 10^6 \text{ км}^2$.

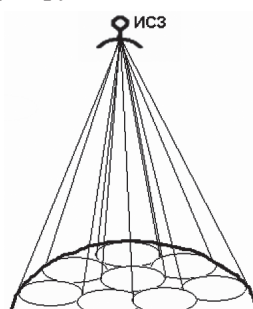


Рис. 10. Вид зоны, формируемой фазированной антенной решеткой спутника

В ГЛОБАЛСТАР используются следующие диапазоны частот:

- для направления *пользователь – ИСЗ*, МГц 610,0 – 1626,5;
- для направления *ИСЗ – пользователь*, МГц 2483,5 – 2500,0;
- для направления *ИСС – ИСЗ*, МГц 6875,95 – 7055,0;
- для направления *ИСЗ – ИСС*, МГц 5091,0 – 5250,0.

Для уплотнения телефонных каналов применяется комбинация методов многостанционного доступа с частотным и кодовым разделением каналов, соответственно МДЧР и МДКР. Для этого общая полоса частот шириной 16,5 МГц разделена на 13 поддиапазонов шириной 1,25 МГц, в каждом из которых выполняется кодовое уплотнение каналов для пятидесяти абонентов. Сигнал каждого абонента преобразуется в широкополосный сигнал шириной 1,25 МГц.

С помощью многостанционного доступа в одном из шестнадцати лучей одновременно обслуживаются 650 абонентов, а в шестнадцати лучах — 10400 абонентов. В режиме телефонной связи осуществляется плавный переход от луча к лучу, от спутника к спутнику. Качество передачи голоса не хуже, чем в сотовой связи. Время установления соединения абонентов — 5 с, вероятность потери вызова в часы наибольшей нагрузки — 0,05. Общее число обслуживаемых системой абонентов — 10^9 . Взаимодействие с сетями общего пользования производится через узловые наземные станции.

Терминалы ГЛОБАЛСТАР выпускаются двухмодовыми, т. е. работающими как по сигналам ГЛОБАЛСТАР, так и в сети сотовой связи стандартов GSM, CDMA, AMPS. Стоимость терминала примерно 559 долл., стоимость 1 мин звонка из любой точки территории России в любую другую точку — примерно 0,99 долл., максимальная выходная мощность — примерно 400 мВт. Погрешность определения местоположения пользователя доплеровским методом — 300 м. При наличии у абонента телефонного роуминга телефоном ГЛОБАЛСТАР можно пользоваться в Западной Европе, на северном и южном Американском континенте (всего более чем в 50 странах мира). В 2007 г. компания GLOBALSTAR SPOT выпустила терминал SPOT SATELLITE MESSANGER для подачи сигнала бедствия пользователем.

На рис. 11 представлена комплектация судового терминала SAT550X системы ГЛОБАЛСТАР. В состав терминала входит антенна (надпалубное оборудование) и мини-трубка для телефонной связи, встроенная в адаптер связи (подпалубное оборудование). Адаптер подключается к персональному компьютеру, обеспечивающему передачу данных, ФАКС, SMS в режиме GSM 900, данных мониторинга и сообщений тревоги и бедствия.



Рис. 11. Внешний вид судового терминала системы ГЛОБАЛСТАР

Максимальная выходная мощность передатчика терминала — 2 Вт, скорость передачи данных — 7,2 кбит/с.

Глобальная низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга ОРБКОММ. Низкоорбитальная спутниковая система связи ОРБКОММ (ORBITAL COMMUNICATION (США, Канада)) предназначена для передачи данных в формате коротких сообщений. Система отличается

низкой стоимостью предоставляемых услуг [12]. В состав наземного сегмента кроме ЦУС входят УЗС и региональные центры управления. Региональный центр управления в России развернут в Москве, три необслуживаемых УЗС действуют в г. Москве, г. Новосибирске, г. Хабаровске. В перспективе в России будут работать шесть УЗС. ОРБКОММ начал функционировать с 1991 г. с постепенным увеличением числа спутников в орбитальной группировке до 48.

Состав орбитальной группировки:

- 24 спутника с наклонением орбит 45° ;
- восемь спутников с наклонением 70° ;
- по восемь спутников с наклонениями 108° и 0° .

Высота круговых орбит — 825 км, время оборота вокруг Земли — 100 мин, диаметр подспутниковой зоны видимости — 5000 км. Вес спутника — 40,7 кг, технический ресурс — 4 года.

Диапазон используемых частот: «вверх» — 148,0 – 150,05 МГц, «вниз» — 137,0 – 138,0 МГц. Скорость передачи данных от абонента — 2,4 кбит/с, от спутника 0151 4,8 кбит/с.

Система ОРБКОММ используется для следующих целей:

- мониторинга подвижных объектов;
- передачи аварийных сообщений;
- слежения за местоположением и состоянием объектов;
- обмена информацией в режиме передачи данных между абонентами системы и абонентами других сетей: электронной почты, X.25, X.400 и др.;
- передачи коротких сообщений абонентам через диспетчерские центры.

Передаваемые короткие сообщения имеют длину 10 бит или 256 бит.

Если абонент системы находится в зоне действия УЗС, то сообщение передается пакетами по 10 бит. Пакет считается принятым, если от УЗС получено подтверждение приема, если подтверждение не получено, то пакет передается еще один раз. Если абонент не находится в зоне действия УЗС, то сообщение состоит из 256 бит и архивируется в памяти спутникового процессора до установления контакта спутника с терминалом получателя или УЗС [13]. На рис. 12 приведен внешний вид мобильного терминала GSC-100 (MAGELLAN). В терминал встроен приемник GPS.



Рис. 12. Внешний вид терминала системы ОРБКОММ

Глобальная спутниковая низкоорбитальная квазидоплеровская радионавигационная система АРГОС. Спутниковая радионавигационная система АРГОС (автоматизированная реляционная геодисциплинарная оперативная система) начала функционировать с 1978 г. (разработка США и Франции), ориентирована на сбор информации в центрах мониторинга со множества объектов. В настоящее время система обслуживает более 16000 таких объектов. АРГОС широко используется для мониторинга рыбопромысловых судов в региональных центрах г. Мурманска и

г. Петропавловска-Камчатского. Система АРГОС не позволяет судам-браконьерам фальсифицировать координаты судов при передаче данных позиционирования.

В состав системы входит два спутника, которые размещены на круговых полярных орбитах, высота орбит — 850 км. Время оборота спутников вокруг Земли составляет примерно 102 мин. При таком времени один и тот же спутник находится над одной и той же точкой поверхности Земли через каждые 24 ч. Среднее время видимости спутника составляет примерно 10 мин, диаметр зоны видимости — 5000 км. На рис. 13 показана полоса покрытия поверхности Земли за два оборота спутника. Эта полоса, из-за вращения Земли, смещается примерно на $25,71^\circ$ на запад (примерно на 2800 км на экваторе) с каждым оборотом спутника.

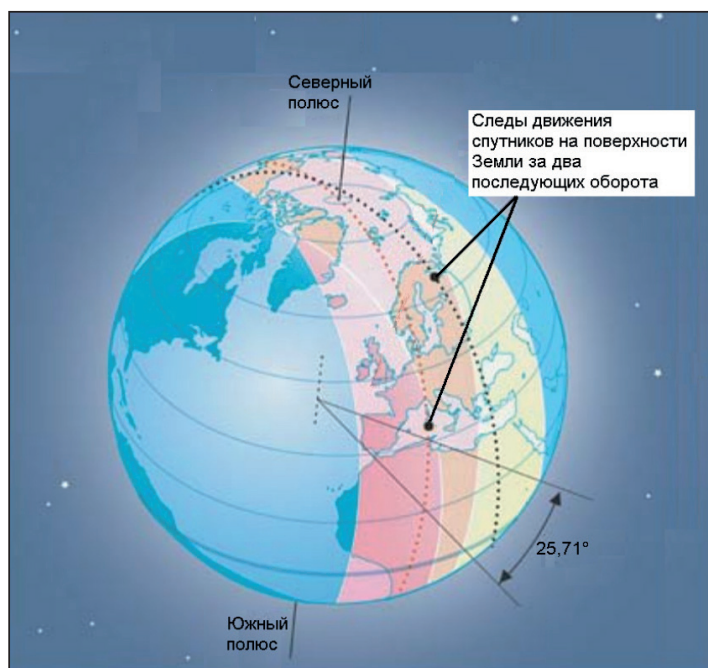


Рис. 13. Зона покрытия за два прохода спутника системы АРГОС

На экваторе каждый спутник в течение суток виден четыре раза: два раза через интервал времени 102 мин и еще два раза с тем же интервалом через 12 ч, когда Земной шар сделает пол-оборота вокруг своей оси. На полюсе каждый спутник за сутки виден 14 раз (по числу оборотов спутника вокруг Земли). Общее число видимых спутников возрастает в 2 раза, так как в состав системы входит два спутника [14].

Технические средства контроля (ТСК), установленные на судах, периодически излучают сигналы на частоте $401,650 \text{ МГц} \pm 30 \text{ МГц}$, длительность излучаемого сигнала — 360 – 920 мс, период повторения сигнала — 45 – 200 с. В передаваемом сигнале содержится сообщение, состоящее из 256 – 4608 бит, в котором передается идентификационный номер ТСК и данные сенсорных датчиков: температура, давление, солёность, сила ветра и др. В сообщении, передаваемом ТСК для спутников АРГОС-1 и АРГОС-2, содержится 256 – 500 бит, для спутников АРГОС-3 — 5608 бит.

Спутники АРГОС-2 и АРГОС-3 обеспечивают двухстороннюю связь с ТСК. В состав ТСК кроме передатчика входят приёмник и процессор. Приёмник предназначен для регистрации сигнала подтверждения о том, что спутник принял и замерил значения доплеровских частот, переданных ТСК. Процессор по данным альманаха, переданного спутником, включает передатчик ТСК лишь на время пролёта спутника над ним. Замеренные значения квазидоплеровских частот сбрасываются со спутника на один из региональных центров, откуда данные передаются в глобальный центр. В глобальном центре после определения координат ТСК результаты передаются заказчику в центр мониторинга.

Координаты объекта рассчитываются глобальным центром обработки на основе переданных данных региональными центрами [15]. Среднеквадратическая погрешность (СКП) определения координат по широте для третьего поколения спутников — менее 250 м. На рис. 14 приведена карта, на которой показаны места расположения региональных и глобальных центров.



Рис. 14. Сеть центров мониторинга системы АРГОС

Глобальные центры обработки измерений находятся в Тулузе (Франция) и около Вашингтона (США), региональные центры сбора измерений расположены по всему миру. Число прохождения спутников системы АРГОС над полюсом — 84 раза в сутки.

Судовая аппаратура ТСК MAR E2 и MAR GE может работать до 48 ч от внутренней батареи и неограниченное время — от внешнего питания. ТСК MAR GE является более совершенной, так как в её состав входит приемник GPS. Внешний вид ТСК MAR GE, установленной на мачте судна, приведен на рис. 15.

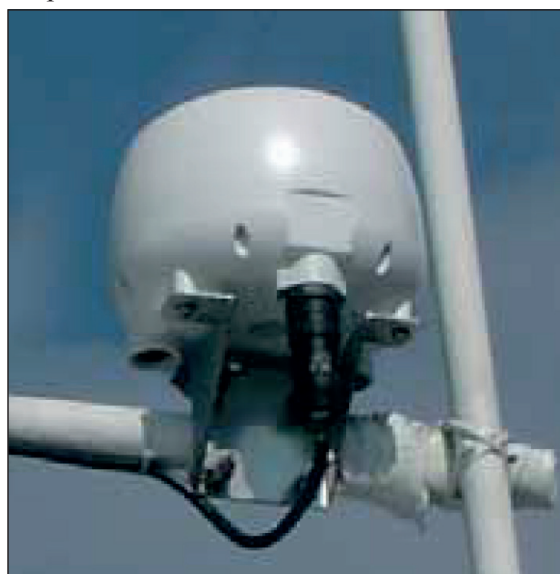


Рис. 15. Внешний вид аппаратуры MAR GE

ТСК MAR GE запоминает показания приемника GPS в момент окончания часа (на 0 ч, 0 мин, 0 с каждого часа) и каждые 140 с передает эти данные на спутник. Передается семь

показаний приемника GPS в предшествующие семь часов, а также показания на момент излучения сигнала. ТСК MAR GE имеет встроенный аккумулятор. К ТКС подключаются сенсоры — устройства, преобразующие физические параметры контролируемого объекта в цифровой код. С помощью передатчика ТСК можно передавать короткие сообщения длиной от 256 до 4608 бит. Для этого к ТСК через коммутационный блок подключается терминал с небольшой клавиатурой.

Центры обработки АРГОС передают своим пользователям вычисленные координаты ТСК, а также данные сенсорных датчиков, подключенных к ТСК в виде файлов определенного формата. Формат данных представляет собой последовательность буквенно-цифровых символов и содержит идентификационный номер ТСК, который передал информацию, показания сенсоров, широту и долготу местоположения передатчика. Система АРГОС обеспечивает обслуживание 100 тыс. объектов.

Глобальная низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга TELEDESIC.

Проект глобальной низкоорбитальной спутниковой системы связи и мониторинга TELEDESIC (США) является самым амбициозным проектом из всех известных, включая действующие системы спутниковой связи. Система TELEDESIC является широкополосной коммуникационной системой, которая создается компаниями Calling Communications, Microsoft, Boing. Система TELEDESIC — это проект глобальной спутниковой связи, которая сможет охватить до 95 % поверхности Земли, предусмотрена также межспутниковая связь [16].

В состав системы будут входить 288 спутников на 12 орбитах. Все спутники объединяются в единую сеть «космического Интернета» (Internet in the sky) для телефонной связи и пакетной передачи данных. Для системы выделены две полосы по 500 МГц в диапазоне частот 20 – 30 ГГц ($\lambda = 1 - 1,5$ см). Для работы терминалов «вверх» выделена полоса частот 28,6 – 29,1 ГГц, «вниз» — 18,8 – 19,3 ГГц. Терминалы оснащены антеннами диаметром от 16 до 180 см, мощность передатчиков терминалов находится в пределах от 0,01 до 4,7 Вт (для высокоскоростных терминалов — от 1,0 до 49 Вт). Приведенные характеристики терминалов зависят от погодных условий. Стандартный терминал поддерживает канал связи со скоростью обмена данными от 16 кбит/с (базовая величина) до 2,048 Мбит/с (что эквивалентно 128 базовым каналам). Высокоскоростные терминалы работают со скоростью 155,52 Мбит/с и 1,24416 Гбит/с. Для сравнения: в системе ИНМАРСАТ - BGAN максимальная скорость передачи данных 0,144 Мбит/с, т. е. в 450 раз меньше. Большая скорость в системе TELEDESIC объясняется широкополосностью этой системы. Передача данных мониторинга производится с помощью приёмников GPS и доплеровским методом.

Глобальная низкоорбитальная группировка спутниковой связи CELESTRI. Система спутниковой связи CELESTRI (celestial — небесный) создаётся фирмой Motorola и состоит из геостационарных и низкоорбитальных спутников. Ранее фирма Motorola разработала успешно функционирующую систему связи IRIDIUM. Система CELESTRI будет обеспечивать пользователей набором мультимедийных услуг: телефон, данные, мониторинг, факс, e-mail, Интернет и видеоконференции.

Низкоорбитальная группировка будет состоять из 63 спутников, расположенных на семи орбитах, высота орбит — 1400 км, наклонение — 48° , период обращения — 1,9 ч. Каждый спутник будет вести передачу данных с пользователями со скоростью до 80 Гбит/с. Предусмотрена межспутниковая связь.

Система CELESTRI работает в диапазоне СВЧ 3,0 – 30,0 ГГц, ($\lambda = 1 - 10$ см).

Частотный диапазон для радиосвязи:

- в направлении «вверх» — 28,6 – 29,1 и 29,5 – 30,0 ГГц;
- в направлении «вниз» — 18,8 – 19,3 и 19,7 – 20,2 ГГц.

Скорость межспутниковой связи — 4,5 Гбит/с.

Набор пользовательской аппаратуры предусматривает терминалы, скорость которых составляет от 64 Кбит/с до 155 Мбит/с. Стоимость самого дешевого комплекта оборудования не превышает 750 долл.

Система CELESTRI обладает высокой скоростью передачи данных и полным набором мультимедийных услуг, однако надёжность связи зависит от погодных условий: наличие дождя, снега и др. Терминалы должны быть оснащены пространственно-избирательными антеннами.

Глобальная низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга РОСТЕЛЕСАТ.

Глобальная низкоорбитальная спутниковая система связи и мониторинга РОСТЕЛЕСАТ (Россия) является многофункциональной телекоммуникационной системой и предназначена для непрерывной связи между подвижными и стационарными абонентами. Режимы работы системы: телефония, передача данных, мониторинг. После окончания развертывания система РОСТЕЛЕСАТ будет близка к системе ИРИДИУМ. Орбитальная группировка системы будет состоять из 91 спутников, число орбитальных плоскостей равно семи (по 13 спутников в каждой плоскости), высота круговых орбит — 700 км, угол наклона орбит — 82°. Зеркальные антенны, установленные на спутниках, формируют 37 парциальных зональных лучей. Терминалы системы будут работать в диапазоне частот 1900 – 2100 МГц ($\lambda = 14 - 15$ см). Скорость передачи данных 19,2 – 64 кбит/с [17].

Глобальная спутниковая низкоорбитальная система связи и мониторинга СИГНАЛ.

Спутниковая низкоорбитальная система связи и мониторинга СИГНАЛ, разрабатываемая международным концерном космической связи (Россия), по характеристикам будет близка к системе ГЛОБАЛСТАР. Система с учетом действующих УНС обеспечивает непрерывную связь на средних и северных широтах. Режимы работы: телефония, передача данных, мониторинг. Орбитальная группировка состоит из 48 спутников, расположенных в четырех плоскостях с разносом по долготе восходящего узла на 90°. На каждой круговой орбите размещено 12 спутников, угол наклона орбит — 74°, высота орбит — 1500 км.

На спутниках установлены три зеркальные антенны, работающие в диапазоне частот:

- 300 – 400 МГц — один луч, покрывающий всю зону;
- 1500 – 1600 МГц — шесть лучей, покрывающие всю зону;
- 11000 – 14000 МГц — три луча, покрывающие всю зону.

Наземный сегмент системы состоит из центра управления системой (ЦУС), командно-измерительных комплексов (КИП) и сети УНС, расположенных в г. Москве, г. Самаре, г. Екатеринбург, г. Томске, г. Чите, г. Комсомольске-на-Амуре.

Терминалы системы работают на частотах:

- в режимах передачи данных и мониторинга — 300 – 400 МГц;
- в режиме телефония — 1500 – 1600 МГц. [18].

Глобальная спутниковая низкоорбитальная система связи и мониторинга ГОНЕЦ.

Спутниковая низкоорбитальная система связи и мониторинга ГОНЕЦ функционирует с 1996 г. по заказу Федерального космического агентства в рамках федеральной космической программы России, по своим характеристикам близка к системе ОРБКОММ. Система предназначена для передачи данных и мониторинга судов, непрерывность связи не обеспечивается [19]. На начальном этапе в состав орбитальной группировки системы будет входить девять спутников, размещённых на двух взаимоперпендикулярных круговых орбитах: на одной орбите размещено три спутника, на другой — шесть. Высота орбит — 1500 км, наклонение — 82,5°, период обращения спутников вокруг Земли — 115 мин.

Наземный комплекс системы состоит из ЦУС и трёх УНС. ЦУС расположен в г. Москве, УНС — в г. Москва, в г. Железногорск Красноярского края и в г. Южно-Сахалинск. Три УНС обеспечивают размер рабочей зоны, представленной на рис. 16.

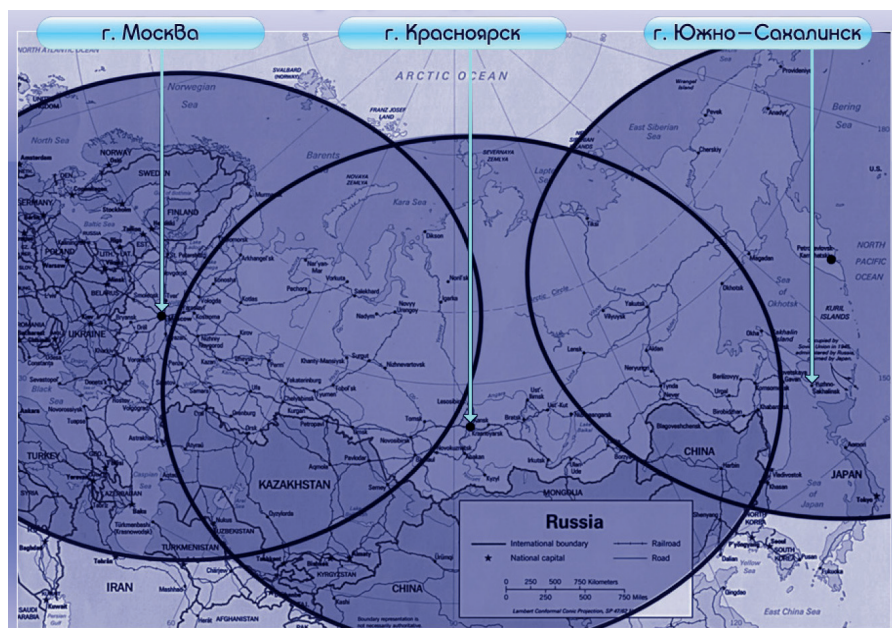


Рис. 16. Рабочая зона системы ГОНЕЦ

Так как диаметр подспутниковой зоны видимости спутника при угле места $\beta = 5^\circ$ равен 4300 км, при расположении дополнительных УНС на побережье Северного Ледовитого океана рабочая зона системы будет перекрывать весь район Арктики. Когда отправитель и получатель сообщения находятся в зоне действия одной и той же УНС, сообщение передается непосредственно между их терминалами через спутник. Когда регионы разные, то сообщение передается от отправителя через спутник на свою УНС, далее через наземный канал связи на УНС получателя и далее через спутник на абонентский терминал получателя. При трёх УНС среднее время ожидания связи на 56° с. ш. составляет 20 мин, при этом один раз в сутки возможно увеличение длительности ожидания до 3 ч.

В северных широтах более 70° для угла места 10° время ожидания связи с вероятностью 0,9 не превышает 28 мин и с вероятностью 0,7 — 9 мин. При увеличении числа спутников в орбитальной группировке до двенадцати на широтах более 70° связь будет практически непрерывной. При расположении абонентов (отправителя и получателя) в зоне обслуживания одной УНС время доставки информации составляет 1 – 2 мин. Пропускная способность спутника равна 15 Мбит/сут, скорость передачи информации — 2,7 Кбит/с, диапазон используемых частот в направлениях *терминал – спутник* и *спутник – терминал* — 200 – 300 МГц. Система способна одновременно обслуживать 4000 – 10000 абонентов. Выходная мощность передатчика терминала — 8 – 10 Вт, скорость передачи данных «вверх» — 9,6 – 76,8 кбит/с, «вниз» — 2,4 – 9,6 кбит/с. Разрабатывается второе поколение системы ГОНЕЦ. В состав системы на шести орбитах будет входить 36 спутников и пять – семь УНС. Система будет обеспечивать связью и мониторингом около 200000 объектов. Пропускная способность системы ГОНЕЦ — 4,86 Гбит/сут.

Глобальная спутниковая низкоорбитальная квазидоплеровская радионавигационная система КУРС. Глобальная спутниковая низкоорбитальная квазидоплеровская радионавигационная система КУРС, разрабатываемая в России, по принципу действия подобна системе АРГОС (США, Франция). В систему КУРС входит два спутника, расположенных на высоте 1000 км на двух взаимно-перпендикулярных круговых полярных орбитах. Время оборота спутников вокруг Земли равно 104 мин [20]. Система КУРС предназначена для мониторинга судов доплеровским методом. Несущая частота сигнала составляет 405 МГц.

Для работы суда должны быть оснащены ТСК, излучающими на частоте 405 МГц синусоидальные послылки длительностью около 1 с с периодом следования посылок 1 мин. В послыл-

ках передается цифровой идентификатор ТСК. Планируется производить ТСК, которые будут передавать в посылках короткие сообщения (от 6 до 10 байт). Бортовая аппаратура на спутниках после первичной обработки посылок ТСК будет передавать данные измеренной доплеровской частоты для определения координат судов на станциях приема и обработки информации (СПОИ).

Координационный центр системы будет производить сбор вычисленных координат судов и передавать их в центр мониторинга. На территории России будут расположены три СПОИ, в дальнейшем число их планируется увеличить. Большая высота орбиты спутников системы КУРС по сравнению с системой АРГОС позволит уменьшить необходимое число СПОИ. Координаты места ТСК (судна) будут определяться с СКП 1,2 км, если судно не имеет хода, и 6,6 км при скорости 15 уз. На средних широтах в течение суток координаты любого судна в Мировом океане определяются 4 раза, а на северных широтах 10 – 15 раз. Ввод в действие отечественной системы КУРС позволит на 70 % уменьшить средства, выделяемые в настоящее время центром мониторинга на оплату услуг системы АРГОС.

Глобальная спутниковая среднеорбитальная система связи и мониторинга ОДИССЕЙ. Спутниковая среднеорбитальная система связи ОДИССЕЙ, разработанная в США Международной компанией OTI (ODISSEY TELECOMUNICATION INTERNATIONAL), работает с 2005 г.

Система связи ОДИССЕЙ предназначена для работы в режиме телефонии, передачи данных (короткие сообщения), мониторинг обеспечивается на всей поверхности Земли. Орбитальная группировка состоит из 12 спутников, высота круговых орбит составляет 10354 км, число плоскостей орбит — три (разнос между долготами восходящих углов — 120°), число спутников в каждой плоскости — четыре, наклонение орбит — 50°. Период обращения спутников вокруг Земли — 6 ч. Число одновременно видимых спутников в рабочей зоне системы ОДИССЕЙ — два – четыре, при этом хотя бы один из спутников имеет угол места не менее 30°, гарантирующий надёжный радиокontakt терминала пользователя со спутником.

Спутники системы оснащены антеннами с фазированными решётками, которые создают в подспутниковой зоне видимости 61 – 163 зональных пятен. По мере движения спутников на обслуживаемой территории формируется географически неподвижная сотовая структура пятен, геометрия этой структуры может меняться. Во время связи переключение с одного спутника на другой производится лишь тогда, когда угол места спутника становится менее 30°.

Терминалы системы работают не только со спутниками, но и в сотовых сетях стандартов GSM, TDMA, CTDMA, PH3, причём доступ к этим сетям является приоритетным. Вызов с терминала вначале поступает в адрес базовой станции сотовой сети и лишь в случае невозможности соединения с абонентом автоматически передаётся на спутник системы. При работе со спутником автоматически выбирается пара частот для дуплексной работы в одном из 61 зонального луча. Передача речи производится со скоростью 4,2 кбит/с, передача данных — 2,4 – 64 кбит/с.

Многостанционный доступ применен с временным, кодовым и частотным разделением — TDMA, CDMA, FDMA. Выделенная полоса частот в канале связи *абонент – спутник* равна 11,35 МГц, в канале *спутник – абонент* — 16,5 МГц. Район рабочей зоны системы одновременно обслуживается двумя спутниками, обеспечивая телефонную связь с 6 тыс. абонентов. Общее число обслуживаемых абонентов системой в перспективе — 9 млн. На рис. 17 приведен внешний вид терминалов системы ОДИССЕЙ. Выходная мощность передатчиков терминалов составляет 0,5 – 5 Вт, коэффициент усиления антенны — 2,5 дБ. Цена терминала составляет 350 – 1000 долл., размер абонентской платы — 25 долл., стоимость одной минуты телефонной связи — 0,75 долл.



Рис. 17. Внешний вид терминала системы ОДИССЕЙ

Мониторинг судов производится с помощью данных позиционирования приёмников ГНСС, передаваемых системой связи ОДИССЕЙ в центр мониторинга. Большой интервал времени между первым и последним отсчётом исключает возможность определения координат доплеровским методом с помощью одного спутника.

Глобальная спутниковая среднеорбитальная система связи и мониторинга АЙКО (ICO). Глобальная спутниковая среднеорбитальная система связи АЙКО (ICO — Intermediate Circular Orbit) разработана в США компанией GLOBAL COMMUNICATIONS. В названии системы слово Intermediate означает промежуточный, так как спутники ICO расположены на промежуточной высоте между высотами низкоорбитальных и среднеорбитальных спутниковых систем. Система АЙКО работает с 1996 г. ГУП «МОРСВЯЗЬСПУТНИК» (Россия) является одним из учредителей компании GLOBAL COMMUNICATIONS.

Система обеспечивает непрерывную работу в режимах телефония, передача данных на всей поверхности Земли обеспечивает:

- персональную связь;
- грузовые и морские перевозки;
- связь для учреждений.

Персональная связь предоставляется пользователям, находящимся вне помещений.

В состав орбитальной группировки спутников системы входит десять рабочих и два резервных спутника. Спутники расположены равномерно на двух взаимно-перпендикулярных круговых орбитах с наклоном 45° , высота орбит равна 11390 км, период обращения спутников вокруг Земли — 6 ч. Диаметр подспутниковой зоны близок к диаметру Земли и составляет 12890 км при угле места спутника $\beta = 10^\circ$. С любой точки земной поверхности в зоне видимости находятся два – четыре спутника. Максимальное время видимости спутника составляет 2 ч. Каждый спутник формирует 163 зональных луча, диаметр пятна на земной поверхности равен 813 км. Диапазон частот терминалов системы в направлении «вверх» равен 1980 – 2010 МГц, в направлении «вниз» — 2170 – 2200 МГц. Каждый спутник обеспечивает работу 4500 телефонных каналов, передаваемых на 750 несущих частотах с временным и кодовым уплотнением (шесть каналов на одну несущую частоту). ЦУС расположен в г. Аксбридже (Великобритания).

В наземный сегмент системы кроме ЦУС входит 12 УНС, которые расположены по всему миру и находятся в зоне видимости спутников. УНС объединены в наземную сеть INCONET. УНС связаны между собой кабелями с высокой пропускной способностью, передают вызовы абонентам в стандартные сети сотовой связи, сеть Интернет, через спутники системы АЙКО. Каждый вызов от абонента через спутник поступает в сеть INCONET, а затем через одну из УНС через спутник конечному пользователю [21].



Рис. 18. Внешний вид терминалов системы АЙКО

Терминалы системы имеют разные модификации. Выходная мощность терминалов — 6 – 10 Вт. На рис. 18 приведены внешние виды терминалов системы АЙКО. Система АЙКО решает задачи мониторинга с помощью приёмников ГНСС.

Обоснование выбора систем спутниковой связи на круговых орбитах для решения задачи мониторинга в северных широтах

В таблице (с. 202) приведены основные характеристики отечественных и зарубежных спутниковых систем связи и мониторинга. В нее включены системы, в которых спутники размещены на круговых орбитах. Здесь отсутствуют спутниковые системы связи со спутниками на эллиптических орбитах. В результате сравнения зарубежных и отечественных систем показано, что ИРИДИУМ и РОСТЕЛЕСАТ, ГЛОБАЛСТАР и СИГНАЛ, ОРБКОММ и ГОНЕЦ, АРГОС и КУРС близки по своим характеристикам друг к другу. Однако, несмотря на схожесть характеристик, существует серьезное различие между зарубежными и отечественными системами. Зарубежные системы являются действующими, а отечественные находятся в стадии развертывания сетей спутников, наземных узловых станций, серийного производства терминалов для разных потребителей.

Из приведенной таблицы можно сделать вывод, что разработчики систем связи со спутниками на круговых орбитах не пришли к единому мнению о том, на каких высотах целесообразно размещать спутники связи, т. е. разрабатываются как низкоорбитальные, так и среднеорбитальные системы спутниковой связи.

Если рассматривать спутниковые РНС, то существует единое мнение, что спутники глобальной РНС должны размещаться на круговых орбитах высотой около 20000 км. Такими системами являются ГЛОНАСС, GPS, ГАЛИЛЕО, КОМПАС. Любая из них обладает бесконечной пропускной способностью: по каждой из этих систем могут работать бесконечное число пользователей, не мешая друг другу. Спутниковые системы связи имеют конечную пропускную способность, поэтому одна любая система из числа рассматриваемых не может решить задачу связи для всего человечества. В России и за рубежом одновременно разрабатывается не одна, а несколько спутниковых систем связи. Однако такое положение могло бы кардинально измениться после завершения разработки TELEDESIC на 288 спутниках. Эта система почти с безграничной пропускной способностью может в будущем заменить другие спутниковые системы связи.

Из приведенных в таблице данных видно, что решение задачи непрерывного мониторинга и связи судов в северных широтах обеспечивают лишь несколько действующих систем. Системы ОРБКОММ, АРГОС, ГОНЕЦ, КУРС решают задачу мониторинга сеансами по расписанию.

Сравнительные характеристики спутниковых систем

Вид системы	Наименование системы	Число спутников в группировке	Число орбит	Высота орбиты, км.	Наклонение орбиты	Диаметр подспутниковой зоны, км	Режим работы ТЛФ, данные, монитор.	Число одновременно видимых спутников	Число зональных лучей	Диаметр зонального луча в подспутниковой зоне, км	Диапазон частот терминала, МГц.	Межспутниковая связь	Мониторинг на северных широтах более 70°
Низкоорбитальные	ИРИДИУМ	66 рабочих, 6 резервных	6	780	86,4°	5000, $\beta = 5^\circ$	ТЛФ, данные, монитор	3 – 4	48	650	1616,0 – 1625,5	Есть	Да, в любое время
	РОСТЕЛЕСАТ	91	7	700	82°	5000	ТЛФ, данные, монитор	Нет данных	37	Нет данных	1900 – 2100	Нет	Да, в любое время
	ГЛОБАЛСТАР	48 рабочих, 4 резервных	8	1414	52°	6670, $\beta = 5^\circ$	ТЛФ, данные, монитор	2 – 3	16	1920	1610,0 – 1626,5 «вверх» 2483,5 – 2500,0 «вниз»	Нет	Да, в любое время
	СИГНАЛ	48	4	1500	74°	6500	ТЛФ, данные, монитор	Нет данных	1, 3; 6	Нет данных	300 – 400 1500 – 1600	Нет	Да, в любое время
	ОРБКОММ	48	3	785		5200, $\beta = 5^\circ$	Данные (короткие сообщ.), монитор	1 – 2	Нет	Нет	168 – 150 «вверх» 137 – 138 «вниз»	Нет	Да, по расписанию
	ГОНЕЦ	24	2	1500	82,5°	6500	Данные, монитор	Нет данных	Нет	Нет	200 – 300	Нет	Да, по расписанию
	АРГОС	2	6	850	~90°	5500, $\beta = 5^\circ$	Монитор	1	Нет	Нет	401,065	Нет	Да, по расписанию
	КУРС	2	2	1000	~90°	6000	Данные, (короткие сообщ.), монитор	Нет данных	Нет	Нет	~ 405	Нет	Да, по расписанию
	TELEDESIC	288	12	Нет данных	Нет данных	Нет данных	ТЛФ, данные, монитор	Нет данных	Множество	50	28600 – 29100 «вверх» 18800 – 19300 «вниз»	Есть	Да, в любое время
	CELESTRI	63	7	1400	48°	6000	ТЛФ, данные, монитор	Нет данных	Множество	Нет данных	28600 – 29100 29500 – 30000 «вверх» 18800 – 19300 19700 – 20200 «вниз»	Есть	Да, в любое время
Квазирегулярно-орбитальные	ОДИССЕЙ	12	3	10354	50°	12800, $\beta = 10^\circ$	ТЛФ, данные (короткие сообщения), монитор	2 – 3	61 с переменной структуры	1500	1610,0 – 1626,5 «вверх» 2483,5 – 2500,0 «вниз»	Нет	Да, в любое время
	АЙКО	10 рабочих, 2 резервных	2	10390	45°	12890, $\beta = 10^\circ$	ТЛФ, данные (короткие сообщения), монитор	2 – 4	163	813	1980 – 2010,5 «вверх» 2171,5 – 2200,0 «вниз»	Нет	Да, в любое время

При организации сбора судовых данных в центрах мониторинга и решения задач связи целесообразно руководствоваться при выборе систем стоимостью сбора данных, оперативностью опроса сети судов, стоимостью терминалов и трафика связи. При выборе систем в базах данных центров мониторинга должны храниться идентификационные номера судовых терминалов.

Заключение

Сравнительный анализ зарубежных и отечественных спутниковых систем связи на круговых орбитах показал, что задача мониторинга и связи судов на северных широтах в настоящее время может эффективно решаться в национальном центре мониторинга «Виктория» с помощью системы ИРИДИУМ, а в региональных центрах — с помощью систем АРГОС, КУРС, ОРБКОММ и ГОНЕЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новак А. Э. Мониторинг объектов в условиях Крайнего севера / А. Э. Новак // European research. — 2015. — № 10 (11). — С. 61–62.
2. Автоматизированные системы мониторинга судоходства / А. Н. Маринич, И. Г. Проценко, В. Ю. Резников, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2003. — 248 с.
3. Припотнюк А. В. Три метода определения координат при мониторинге судов / А. В. Припотнюк, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 21–25.
4. Ильин А. А. Цифровые терминалы спутниковых систем связи. Справочное издание / А. А. Ильин, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов / под общ. ред. Ю. М. Устинова — М. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с.
5. Устинов Ю. М. Анализ современного состояния судовых средств связи и спасания / Ю. М. Устинов, А. В. Припотнюк, А. И. Кулинич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 166–174.
6. Андрюшечкин Ю. Н. К вопросу использования современных информационных технологий для обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях России / Ю. Н. Андрюшечкин, В. В. Каретников, А. П. Яснов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 208–213.
7. Кулинич А. И. Передача данных позиционирования судов в северных широтах с помощью спутниковых систем связи на круговых и эллиптических орбитах для решения задач мониторинга / А. И. Кулинич // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2012. — № 22. — С. 14–18.
8. Кузовников А. В. Проблемы развития низкоорбитальной многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» / А. В. Кузовников, Н. А. Тестоедов, В. А. Агуреев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 6 (52). — С. 158–163.
9. Кулинич А. И. Мониторинг судов на северных широтах с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ-D+ путём использования модифицированной квазистационарной орбиты системы связи ИНМАРСАТ / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутниковые технологии и бизнес. — 2013. — Декабрь. — С. 8–12.
10. Спутниковые телефоны Иридиум [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.tecckom.com/iridium_index.php (дата обращения — 09.10.16).
11. Система глобальной спутниковой связи Иридиум (Iridium) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.satinfo.ru/iridium_spec.php (дата обращения — 09.10.16).
12. Сигналы со спутника ORBCOMM [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.radioscanner.ru/forum/topic22977.html> (дата обращения — 09.10.16).

13. *Vessel Tracking* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.orbcomm.com/en/industries/maritime/vessel-tracking> (дата обращения — 09.10.16).
14. Argos [Электронный ресурс]: Официальный сайт. — Режим доступа: www.argos-system.com (дата обращения — 09.10.16).
15. Argos-tools [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.gis-lab.info/programs/argos9/index-rus.html (дата обращения — 09.10.16).
16. Принцип работы асинхронного спутникового интернета [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://cosmolink.ru/princip_raboty_spytnikovogo_interneta/princip_raboty_asinhronnogo_spytnikovogo_interneta.html (дата обращения — 09.10.16).
17. GPS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.gps.gov/systems/gps (дата обращения — 16.10.16).
18. Дятлов А. П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учеб. пособие / А. П. Дятлов. — Ч. 1. — Таганрог: ТРТУ, 1997. — 95 с.
19. Space and Tech [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.spaceandtech.com (дата обращения — 09.10.16).
20. Sturza M. A. Teledesic satellite system overview. [Электронный ресурс] / M. A. Sturza, F. Ghazvinian. — Режим доступа: <http://www.3csysco.com/Pubs/Teledesic%20Satellite%20System%20Overview.pdf> (дата обращения — 16.10.16).
21. Попова И. Курс — на персонализацию // Connect! Мир Связи [Электронный ресурс] / И. Попова. — Режим доступа: <http://www.connect.ru/article.asp?id=5086> (дата обращения — 09.10.16).

MONITORING OF SHIPS ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE USING SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

The article discusses the use of satellite systems for monitoring vessels in high latitudes. It is shown that the increasing role of the Arctic in the economy necessitates a reliable and uninterrupted connection control the position of the courts. Given the challenges facing traditional high-frequency communications at high latitudes. Expresses assumptions about the need to use satellite communication, an alternative to INMARSAT. It is shown that the current state of monitoring systems based on the capabilities of VICTORIA with the use of communication systems INMARSAT and ARGOS. Overall assessment of the medium-altitude earth orbit and low-orbit satellite communication systems with circular orbits for the monitoring objectives. Compares and contrasts the systems for energy, the coverage area, the number of satellites in the system bandwidth and contact time. here are analyzed the characteristics of low-orbit satellite systems IRIDIUM, GLOBALSTAR, ORBKOMM, ARGOS, TELEDISIC, CELESTRI, domestic systems ROSTELESAT, SIGNAL, MESSENGER, COURSE, medium-altitude earth orbit systems ODYSSEUS and AIKO. The characteristics and appearance of terminal systems, the materials on the use of targeted zonal beams, the exchange of information on satellites and inter-satellite exchange in some cases. Based on the analysis of the comparative table of characteristics of communication systems. Formulated the conclusion about the possibility of using systems for monitoring, either continuously or on schedule. It is proposed to use the satellite system ARGOS, COURSE, ORBKOMM and MESSENGER as an alternative system for monitoring ships in the Arctic and along the Northern sea route in connection with impossibility to use the INMARSAT system.

Keywords: satellite communication, monitoring, Northern sea route, terminals, zonal rays, monitoring centre.

REFERENCES

1. Novak, A. "Monitoring of objects in the conditions of Far North." *European research* 10(11) (2015): 61–62.
2. Marinich, A. N., I. G. Procenko, V. Ju. Reznikov, Ju. M. Ustinov, and A. R. Shigabutdinov, editors. *Avtomatizirovannye sistemy monitoringa sudohodstva*. SPb.: Sudostroenie, 2003.
3. Pripotnjuk, A. V., A. N. Marinich, and Ju. M. Ustinov. "Three methods of determination of coordinates when monitoring vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 21–25.
4. Ilin, A. A., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. *Cifrovye terminaly sputnikovyh sistem svyazi. Spravochnoe izdanie*. SPb.: Dean, 2005.

5. Ustinov, Yury Matveevich, Andrey Vladimirovich Pripotnyuk, and Andrey Ivanovich Kulinich. "Analysis of the current state of ship communications and rescue equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 166–174.
6. Andrushechkin, Ju. N., V. V. Karetnikov, and A. P. Jasnov. "On the question of the use of modern information technology for navigation safety on inland Russian waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 208–213.
7. Kulinich, A. I. "Data transmission of vessels positioning in northern latitudes by means of satellite communication systems in circular and elliptic orbits for the decision of monitoring problems." *Bulletin of Kamchatka State Technical University* 22 (2012): 14–18.
8. Kuzovnikov, A. V., N. A. Testodov, and V. A. Agureev. "Problems of development of low-orbit multifunctional personal satellite communication system «Gonets-DIM»." *Vestnik SibGAU* 6(52) (2013): 158–163.
9. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. "Monitoring sudov na severnyh shirotah s pomoshhju terminalov INMARSAT-S i INMARSAT-D+ putjom ispolzovaniya modificirovannoj kvazistacionarnoj orbity sistemy svjazi INMARSAT." *Sputnikovytehnologii i biznes* December (2013): 8–12.
10. Sputnikovytefony Iridium. Web. 9 Oct. 2016 <www.teccom.com/iridium_index.php>.
11. Sistema globalnoj sputnikovoj svjazi Iridium (Iridium). Web. 9 Oct. 2016 <www.satinfo.ru/iridium_spec.php>.
12. Signaly so sputnika ORBCOMM. Web. 9 Oct. 2016 <<http://www.radioscanner.ru/forum/topic22977.html>>.
13. Vessel Tracking. Web. 9 Oct. 2016 <<http://www.orbcomm.com/en/industries/maritime/vessel-tracking>>.
14. Argos. Web. 9 Oct. 2016 <www.argos-system.com>.
15. Argos-tools. Web. 9 Oct. 2016 <www.gis-lab.info/programs/argos9/index-rus.html>.
16. Princip raboty asinhronnogo sputnikovogo internet. Web. 9 Oct. 2016 <http://cosmolink.ru/princip_raboty_spytnikovogo_interneta/princip_raboty_asinhronnogo_spytnikovogo_interneta.html>.
17. GPS. Web. 16 Oct. 2016 <www.gps.gov/systems/gps>.
18. Djatlov, A. P. *Sistemy sputnikovoj svjazi s podvizhnymi obektami: Uchebnoe posobie*. Ch. 1. Taganrog: TRTU, 1997.
19. Space and Tech. Web. 9 Oct. 2016 <www.spaceandtech.com>.
20. Sturza, M. A., and F. Ghazvinian. "Teledesic satellite system overview." Web. 16 Oct. 2016 <www.3csysco.com/Pubs/Teledesic%20Satellite%20System%20Overview.pdf>.
21. Popova, I. "Kurs - na personalizaciju." *Connect! Mir Svjazi*. Web. 9 Oct. 2016 <<http://www.connect.ru/article.asp?id=5086>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринич Александр Николаевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
amarinich@mail.ru
Припотнюк Андрей Владимирович —
инструктор МУТЦ, методист направления ГМССБ.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
apripotnyuk@mts.spb.su, kaf_tsn@gumrf.ru
Устинов Юрий Матвеевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marinich Aleksandr Nikolaevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
amarinich@mail.ru
Pripotnyuk Andrey Vladimirovich —
instructor of Makarov training centre.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
apripotnyuk@mts.spb.su
Ustinov Yury Matveevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ СУДОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ

Задача оптимального управления в системе электродвижения судна по критерию минимума потерь, обеспечивающего желаемые переходные процессы и заданное значение выходной целевой функции, решена с использованием методов теории автоматического регулирования. Судовая электроэнергетическая система судна с системой электродвижения рассмотрена как совокупность подсистем управления в соответствии с основными элементами судовой системы. Сформулирована цель оптимального управления — повышение эффективности передачи энергии от двигателя к движителю за счет снижения потерь энергии. При этом судовая электроэнергетическая система с системой электродвижения рассмотрена как единая система с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум. Предложено решение задачи оптимального управления как совокупность систем с контурами оптимального управления, настроенных на технический оптимум, и оптимальным регулятором. Представлена структура построения системы оптимального управления динамической системы. Получено аналитическое решение для формирования оптимального регулятора с оптимальным управлением. Построена математическая модель судовой электроэнергетической системы с системой электродвижения гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами. Для реализации был использован математический редактор SIMULINK (приложение MATLAB). При этом целевой выходной функцией была принята скорость вращения винта. Проведено исследование работы модели при раздельном управлении подсистемами и оптимального управления по критерию минимума потерь энергии. Показана эффективность построения оптимальных систем управления при передаче энергии от теплового двигателя к исполнительному механизму, зависимости потерь от скорости вращения винта по сравнению с раздельным управлением системами судна.

Ключевые слова: система электродвижения судна, математическая модель судовой электроэнергетической системы, гребная дизель-электрическая установка с униполярными машинами, функция оптимального управления, оптимальный регулятор, критерий минимизации потерь энергии, эффективность построения оптимальных систем управления.

Введение

В судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с системой электродвижения (СЭД) существует множество устройств, объединенных процессом производства, преобразования, распределения и приема электроэнергии (рис. 1) [1]. Каждое устройство призвано выполнять свою функцию, и поэтому имеет свои переменные управления, состояния и выходную функцию. В целом, управление переменными системы электродвижения призвано обеспечить основную целевую функцию: скорость вращения винта или поддержание момента на валу. В совокупности СЭЭС с СЭД обеспечивает передачу произведенной энергии двигателя через устройства перераспределения к движителю винту судна и является наиболее перспективной для энергоемких судовых систем [2].

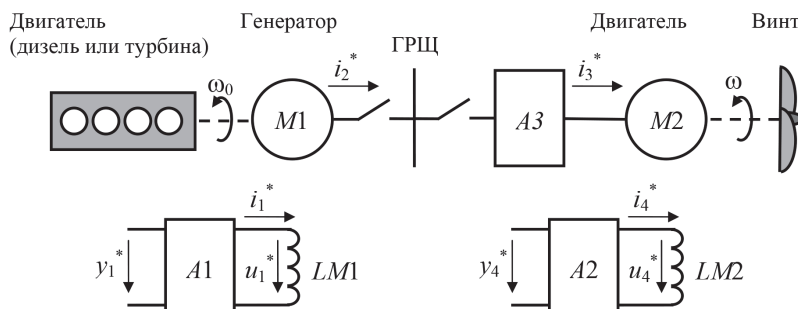


Рис. 1. Структурно-функциональная схема судовой электроэнергетической системы с системой электродвижения

В СЭЭС можно выделить следующие подсистемы управления согласно ее элементам:

1) система управления частотой вращения генерирующей установки. В ее задачу входит поддержание стабильной частоты вращения дизеля или турбины и генератора;

2) система управления уровнем генерируемого напряжения. Это системы возбуждения генераторов;

3) системы преобразования электроэнергии. С точки зрения управления — это управляемые выпрямители, инверторы тока и напряжения, непосредственные преобразователи частоты. Выходными переменными данных устройств являются уровень и частота напряжения (тока) подводимые к гребному электродвигателю;

4) система управления приемником электроэнергии гребным электродвигателем. Имеет несколько переменных управления в зависимости от типа электродвигателя. В основном — это переменные, управляющие потоком возбуждения и током нагрузки.

В классической системе электродвижения судна при раздельном управлении каждая подсистема управления функционирует как локальная замкнутая система без учета состояния других подсистем. С точки зрения эффективности передачи произведенной энергии от двигателя к движителю, такое управление не является оптимальным, потому как подразумевает поддержание переменных состояния каждой подсистемы на номинальных уровнях, кроме одной переменной, обеспечивающей основную выходную целевую функцию. Так, поддержание номинальных оборотов дизель-генератора ведет к дополнительному расходу топлива, поддержание номинальных значений возбуждения генератора или электродвигателя — к дополнительным потерям на возбуждение, т. е. СЭЭС с СЭД настроены так, чтобы максимально быстро доставить необходимую мощность на винт, хотя в таком режиме судно работает не всегда.

Проблему обеспечения эффективности передачи энергии и уменьшения потерь решают различными многокритериальными подходами к выбору структуры СЭЭС [3] – [5], такими как дробление мощности дизель-генераторов или турбогенераторов, разделение их по мощности на режимы маневрирования и крейсерского хода или применение многодвигательной системы. Это ведет к увеличению массогабаритных показателей и увеличению потерь.

Цель оптимального управления СЭЭС с СЭД — максимально эффективно передать произведенную мощность от двигателя к движителю (винту) с минимальными потерями электроэнергии в целом. Это возможно, если рассматривать СЭЭС с СЭД как единую систему с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум, обеспечивая критерий оптимальности: минимум потерь при сохранении значения выходной целевой функции.

Основная часть

Решение данной задачи связано с определенными сложностями. Полученная оптимальная зависимость управления в большинстве случаев не имеет аналитического решения для нелинейных систем, а решение для линейных систем может быть получено только численными методами и только для квадратичного критерия качества. Формирование динамики по корням характеристического уравнения не дает желаемых динамических процессов. Корневые методы дают желаемые динамические процессы и, соответственно, субъективно лучшую динамику, но не решают задачи оптимального управления. В связи с этим рассматриваются различные подходы к решению данных задач [6] – [8].

Предлагается решение задачи оптимального управления следующим образом. Рассмотрим СЭЭС с СЭД как динамическую систему, которая описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{X} = f(U, X_1, X_2), \quad (1)$$

где U — вектор управляющих воздействий; $X = X_1 \cup X_2$ — вектор переменных состояния; $X_1 \in X$ — вектор с размерностью вектора U , переменные состояния которого доступны для наблюдения; $X_2 \in X$ — дополнение вектора X_1 до вектора X .

Методами параллельной или(и) последовательной коррекции для каждой подсистемы сформируем динамику с желаемыми динамическими процессами, регуляторами W_p таким образом, чтобы статическая ошибка равнялась нулю:

$$\Delta X_1 = X_{1\text{опт}}^0 - K_{\text{OC}} \cdot X_1 = 0.$$

Выбор параметров регуляторов может быть выполнен с использованием корневых методов.

Будем полагать, что переходная характеристика желаемого динамического процесса может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией. При этом входные переменные $X_{1\text{опт}}^0$ будут задавать выходные переменные X_1 .

В результате формирования желаемого динамического поведения подсистем исходная система дифференциальных уравнений примет следующий вид (рис. 2):

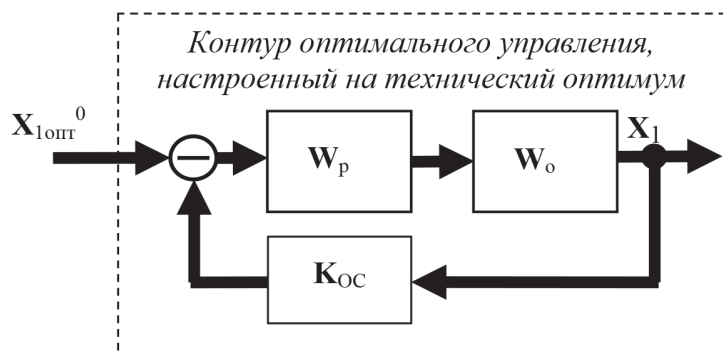


Рис. 2. Формирование желаемых переходных характеристик СЭЭС с СЭД методами последовательной коррекции:

W_o — передаточная функция объектов управления подсистем;
 W_p — передаточная функция регулятора; K_{OC} — вектор пропорциональной обратной связи

$$pX = f_0(X_{1\text{опт}}^0, X_1, X_2), \quad (2)$$

где $X_{1\text{опт}}^0$ — вектор новых управляющих воздействий, задающих статические значения переменных состояния X_1 .

Для определения оптимальных управляющих воздействий $X_{1\text{опт}}^0$ должна быть сформирована функция оптимального управления. Под функцией оптимальности будем понимать потери энергии при ее передаче от двигателя к движителю:

$$\Delta P(X_{11}, X_{12}, X_2). \quad (3)$$

Положим, что задача управления СЭЭС состоит в формировании заданного значения целевой функции (скорость винта или момента на валу)

$$M = f_m(X_{11}), \quad (4)$$

которая является функцией переменных состояния $X_{11} \in X_1$. Дополнение вектора X_{11} до вектора X_1 обозначим X_{12} : $X_{11} \cup X_{12} = X_1$.

Из выражения (4) можно найти один из элементов вектора X_{11} , например

$$x_1 = M \cdot f_m^{-1}(X_{11}'), \quad (5)$$

где X_{11}' — вектор X_{11} без элемента x_1 ; f_m^{-1} — функция, обратная f_m .

Используя введенные обозначения, переформируем функцию оптимального управления (3) в следующий вид:

$$\Delta P(M \cdot f_m^{-1}(X_{11}'), X_{11}', X_{12}, X_2) = \Delta P_m(M, X_1', X_2), \quad (6)$$

где ΔP_m — функция оптимального управления с учетом заданного значения целевой функции M ; X_1' — вектор X_1 без элемента x_1 .

В стационарном режиме система уравнений (2) примет вид

$$0 = f_{\text{опт}}(X_{\text{опт}}^0, X_1, X_2).$$

Из данного уравнения с учетом отсутствия статической ошибки в управлении выразим вектор $X_2 = f_2(X_{\text{опт}}^0, X_1)$ и подставим в выражение функции оптимального управления (6). В результате получим функцию в следующем виде:

$$\Delta P_M(M, X_1', f_2(X_1)) = \Delta P_A(M, X_1'). \quad (7)$$

Найдем минимум функции потерь в пространстве, заданном вектором переменных состояния X_1' . Для этого выполним дифференцирование по элементам вектора X_1' . В результате получим вектор производных

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X_1')}{\partial X_1'}.$$

Положим, что существует вектор X_1' , который обращает элементы вектора производных $D\Delta P_A$ в ноль:

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X_1')}{\partial X_1'} = 0.$$

Тогда в пространстве, заданном вектором X_1' существует оптимальное состояние, минимизирующее функцию оптимального управления (7).

В этом случае вектор управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^{0'} = X_1'$ и находится путем решения уравнения

$$\frac{\partial \Delta P_A(M, X_{\text{опт}}^{0'})}{\partial X_{\text{опт}}^{0'}} = 0,$$

где $X_{\text{опт}}^{0'}$ — вектор $X_{\text{опт}}^0$ без элемента x_1^0 . Элемент x_1^0 может быть найден из выражения (5).

Решение уравнения дает вектор оптимальных значений управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^0 = f(M, X_1)$, таким образом, в системе с оптимальным управлением формируется оптимальный регулятор

$$W_{\text{опт}} = \frac{X_{\text{опт}}^0}{f(M, X_1)}.$$

В итоге система оптимального управления примет следующий вид (рис. 3):

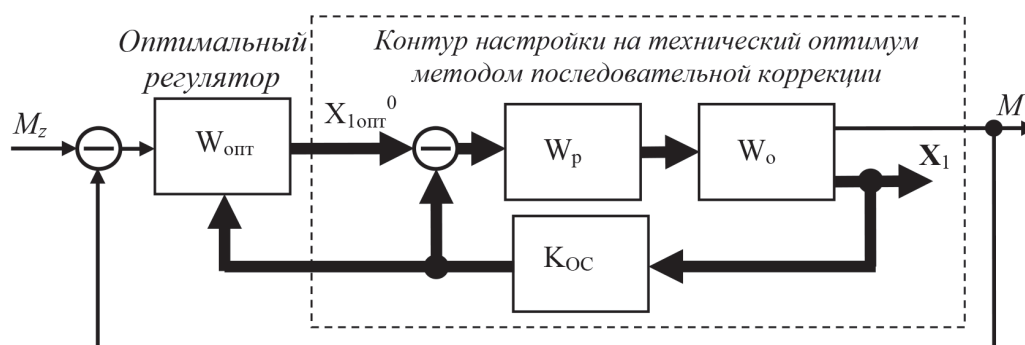


Рис. 3. Система оптимального управления динамической системой:

W_o — передаточная функция объекта управления; W_p — передаточная функция регулятора; $W_{\text{опт}}$ — передаточная функция оптимального регулятора; $K_{\text{ос}}$ — вектор пропорциональной обратной связи; M_z — заданное значение целевой функции M

Данный результат построения оптимального управления в СЭД судов позволяет найти и сформировать управляющие воздействия каждой подсистемы СЭЭС, которые в целом миними-

зируют функцию оптимального управления, поддерживают заданное значение целевой функции. Переход же от одного оптимального состояния системы к другому оптимальному состоянию происходит по желаемым динамическим процессам [9], которые протекают с заданным перерегулированием и максимальным быстродействием. Способ применим также для формирования оптимального управления в кусочно-линейных динамических системах.

Согласно данному подходу была построена математическая модель СЭЭС с СЭД гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами (рис. 4), которые являются одними из перспективных машин, применяемых при проектировании гребных электрических установок [10].

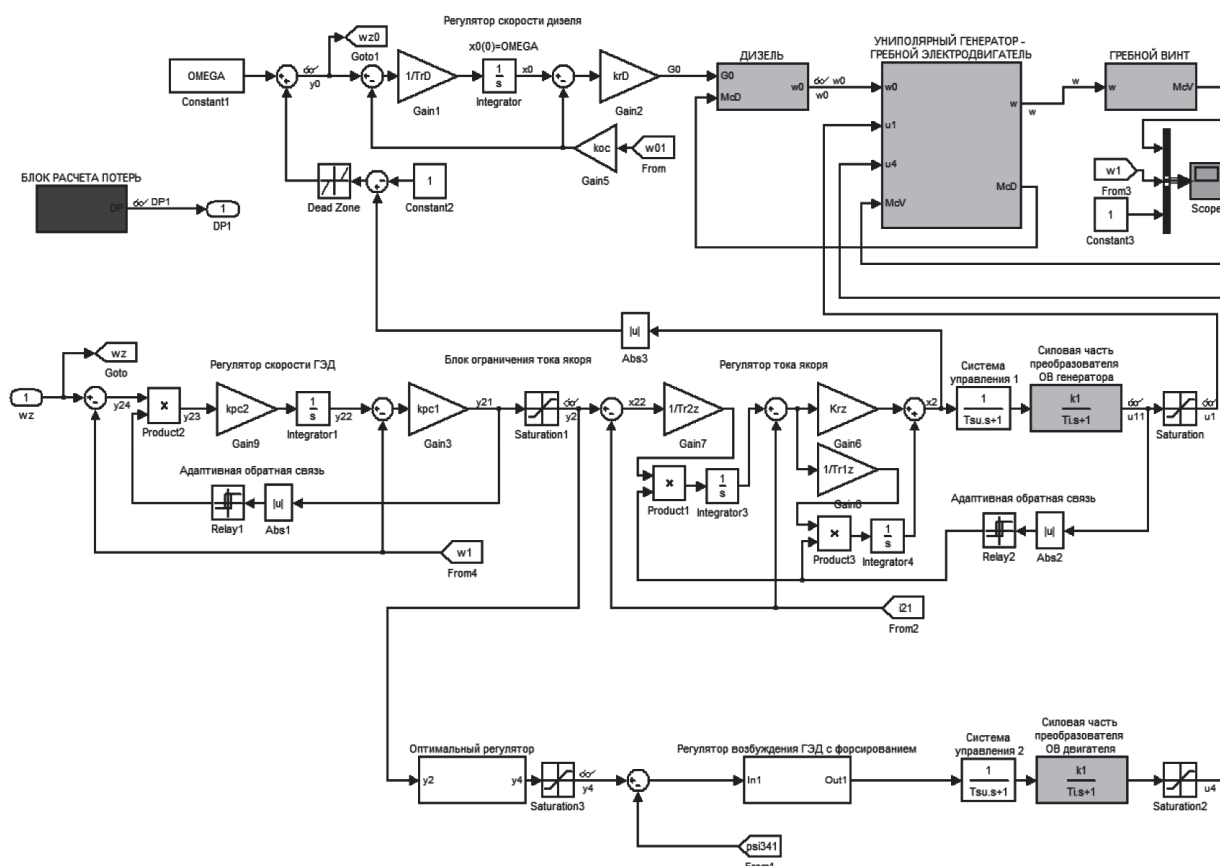


Рис. 4. Структурная схема управления математической модели гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами

В качестве критерия оптимального управления принята суммарная величина потерь энергии в элементах канала дизель – генератор – двигатель и преобразователях соответственно

$$\Delta P_D, \Delta P_G, \Delta P_M, \Delta P_V;$$

$$\Delta P = \Delta P_D + \Delta P_{MGV}$$

где $\Delta P_{MGV} = \Delta P_M + \Delta P_G + \Delta P_V$ — потери энергии в двигателе, генераторе и преобразователе.

Для реализации был использован математический редактор SIMULINK (приложение MATLAB), который наиболее полно позволяет провести моделирование и исследование [11]. Целевой выходной функцией была принята скорость вращения винта. Построены математические модели всех элементов гребной электрической установки: дизеля, генератора, двигателя, винта [12]. Методами последовательной коррекции сформированы контуры управления дизелем, униполярного генератора и двигателя. Раздельные контуры управления элементами СЭЭС соответствуют желаемым переходным характеристикам и имеют нулевую статическую ошибку. Затем для построения системы оптимального управления СЭЭС один из контуров управления свя-

зывается с задающим значением, а остальное управление контуров вычисляется оптимальными регуляторами по заданному критерию минимума потерь исходя из текущих значений переменных состояния. В полученной модели с задающим значением частоты вращения винта w_z связан контур управления возбуждения генератора, а скорость вращения дизеля w_0 и возбуждение гребным электродвигателем вычисляются оптимальными регуляторами. Для анализа величины потерь в системе был создан отдельный блок расчета суммарных потерь.

Выводы

По результатам моделирования получены динамические и статические зависимости потерь энергии от скорости вращения винта в различных режимах: оптимального управления и классического — при раздельном управлении подсистемами СЭЭС. Зависимости потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме при работе винта в свободной воде и в швартовом режиме представлены на рис. 5. Исследования показывают, что экономия энергии составляет около 5 – 13 %.

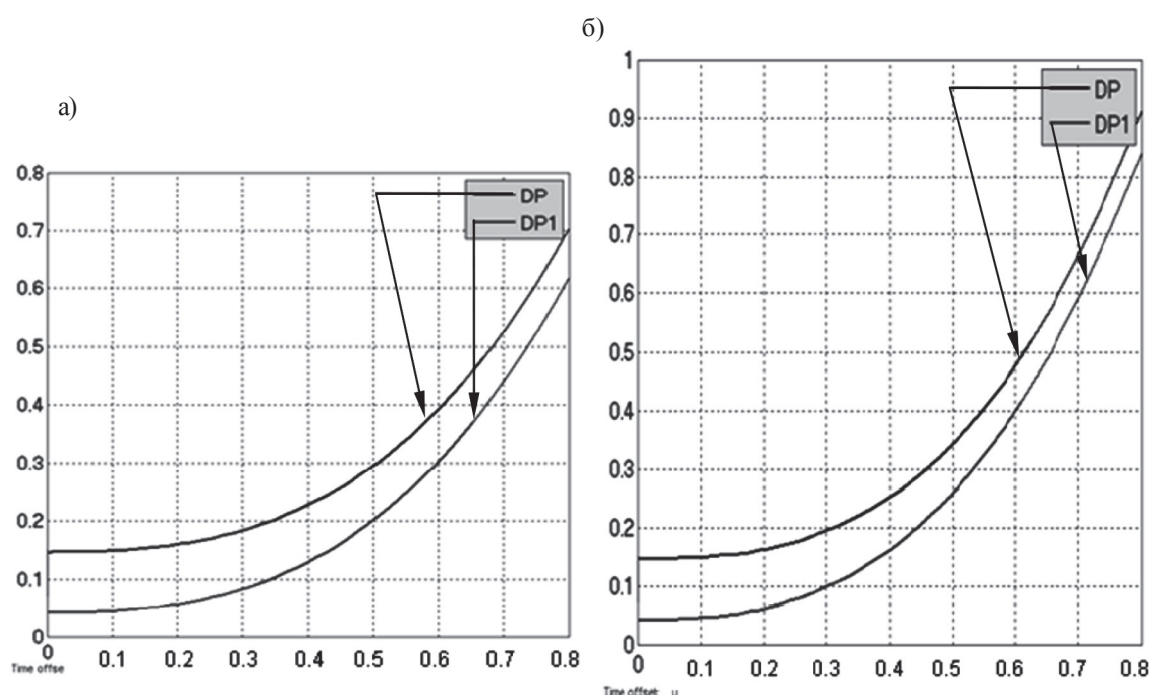


Рис. 5. Зависимость потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме:
а — работа винта в свободной воде; б — работа винта в швартовом режиме,
где DP — потери при раздельном управлении, DP1 — потери при оптимальном управлении

Данный подход показывает эффективность построения оптимальных систем управления по критерию минимума потерь энергии при её передаче от теплового двигателя к исполнительному механизму в судовых электроэнергетических системах с системой электродвижения судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Коршунов В. Н. Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Коршунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологдинские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.
3. Гильмияров Е. Б. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки / Е. Б. Гильмияров, В. В. Цветков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 3. — С. 502–513.

4. Яровенко В. А. Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблемы техники. — 2013. — № 2. — С. 82–94.
5. Kumar L. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review / L. Kumar, S. Jain // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2014. — Vol. 29. — Pp. 924–940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
6. Жадобин Н. Е. Нечеткие регуляторы в системах управления судовыми энергетическими установками / Н. Е. Жадобин, А. И. Лебедев, О. Г. Данилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 62–68.
7. Китаева С. А. Синтез оптимальной системы управления вентильной гребной электрической установкой в условиях действия случайного морского волнения / С. А. Китаева, К. В. Чупина // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2007. — № 19. — С. 59–64.
8. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
9. Румянцев А. Ю. Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 92–94.
10. Бровцинова Л. М. Перспективность гребных электрических установок с униполярными машинами / Л. М. Бровцинова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, А. Ю. Румянцев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. — 2014. — № 7. — С. 37–39.
11. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 185–191.
12. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178.

OPTIMAL CONTROL OF THE ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS OF VESSELS ON THE CRITERION OF MINIMUM LOSSES

The problem of optimal control system for ship propulsion criterion of minimum losses, providing the desired transients and the target value of the output of the objective function is solved using the methods of automatic control theory. Ship power system with the ship propulsion system is considered as a set of management subsystems in accordance with the basic elements of the ship's systems. Formulated the goal of optimal control as increasing efficiency of energy transfer from the engine to the mover by reducing energy losses. This ship power system with electric propulsion system is considered as a single system with a plurality of control variables, each of which is tuned to its optimum. A solution to the optimal control problem as a set of systems with optimal control circuits tuned to optimum technical and optimal control. The structure for constructing an optimal control system of a dynamic system. An analytical solution for the formation of the optimal controller with optimal control. A mathematical model of the ship's electric power system with a system of electric propulsion diesel-electric propulsion units with unipolar machines. Mathematics Editor SIMULINK (MATLAB application) was used for implementation. At the same time the speed of rotation of the screw was adopted target output function. A study of the model with separate control subsystems and optimal control on the criterion of a minimum energy loss. The efficiency of constructing optimal control systems in the transmission of energy from the heat engine to an actuator in the form of loss of dependency on the rotational speed of the screw in comparison with the separate management vessel systems.

Keywords: ship propulsion system, the mathematical model of the ship's electric power system, rowing diesel-electric system with unipolar machines feature optimal control, optimal control, the criterion of minimizing energy losses, effects of constructing optimal control systems.

REFERENCES

1. 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.

2. Korshunov, V. N., T. E. Kuvshinov, and A. N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovyh jelektroenergeticheskikh system." *Vologdinskie chtenija* 69 (2008): 139–145.
3. Gilmijarov, E. B., and V. V. Cvetkov. "Mnogokriterialnyj podhod k vyboru sudovoj jenergeticheskoy ustanovki." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* 9.3 (2006): 502–513.
4. Jarovenko, V. A. "Sistemnyj podhod k voprosam proektirovaniya grebnyh jenergeticheskikh ustanovok." *Problemi tehniki* 2 (2013): 82–94.
5. Kumar, Lalit, and Shailendra Jain. "Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014): 924–940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
6. Zhadobin, N. E., A. I. Lebedev, and O. G. Danilov. "Nechetkie reguljatory v sistemah upravlenija sudovymi jenergeticheskimi ustanovkami." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 62–68.
7. Kitaeva, S. A., and K. V. Chupina. "Sintez optimalnoj sistemy upravlenija ventilnoj grebnoj jelektricheskoy ustanovkoj v uslovijah dejstvija sluchajnogo morskogo volnenija." *Nauchnye trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tehničeskogo rybohozjajstvennogo universiteta* 19 (2007): 59–64.
8. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelectrotehničeskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rečnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2013.
9. Rumyantsev, A. Y., and V. F. Samoseyko. "Solution of the Problem of Optimal Control of a Dynamic System that Provides the Desired Transient Response." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.4 (2015): 92–94.
10. Brovtsinova, L. M., V. F. Samoseyko, A. V. Saushev, and A. Yu. Rumyantsev. "Prospects of rowing electrical units with unipolar cars." *Sovremennaja nauka: aktualnye problemy i puti ih reshenija* 7 (2014): 37–39.
11. Grigorev, A. V., and E. A. Glekler. "Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191.
12. Romanovskiy, Viktor Viktorovich, Mirza Alimovich Sjubaev, and Igor Markovich Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Румянцев Алексей Юрьевич —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
stehnika@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Белоусова Надежда Владиславовна —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rumyantsev Alexey Yurevich —
Senior Lecturer.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
stehnika@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Samoseiko Veniamin Frantsevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Belousova Nadezhda Vladislavovna —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕЛИОСИСТЕМ В ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ, РАБОТАЮЩИХ В МЕСТАХ ДЕФИЦИТА ЭНЕРГИИ И НА КОРАБЛЯХ ДАЛЬНОГО ПЛАВАНИЯ

В статье рассматривается решение проблемы с дефицитом электрической энергии в трудно-доступных регионах, в местах экологических катастроф, на судовых кораблях дальнего следования за счет разработки энергоэффективной установки, работающей на возобновляемых источниках энергии, компактных размеров и с возможностью быстрого монтажа и запуска. За счет разработки экспериментального стенда солнечной электростанции и экспериментальных исследований получены необходимые тепловые параметры для работы с мини-паровой турбиной, работающей на паре с температурой более 190 °С и с давлением 5 Бар. Приведено описание возможности получения энергии для электростанции за счет преобразования солнечной энергии в тепловую при помощи солнечных коллекторов и солнечных концентраторов. Приведены технические характеристики устройств, предназначенных для преобразования солнечной энергии в тепловую. Проведен анализ, на основании которого выбраны оптимальные методы для преобразования солнечной энергии. Представлен экспериментальный стенд с новым методом выработки электрической энергии за счет использования тепловой энергии солнца. Рассчитаны характеристики паровой турбины для работы в составе солнечной электростанции. Представлена и описана схема выработки пара. Приведены результаты производительности электростанции для различных времен года при использовании различной площади солнечного концентратора и количества трубок вакуумного коллектора. На основании экспериментальных исследований и теоретических расчетов впервые получена зависимость окупаемости станции при использовании концентратора и коллектора от региона использования установки. Выявлены зависимость окупаемости установки от площади солнечных концентраторов и количества трубок вакуумных коллекторов. Доказана целесообразность использования солнечных коллекторов и солнечных концентраторов в составе электростанции для выработки электрической энергии от одного комплекса в объеме 7,5 кВт·ч на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: солнечная электростанция, линзы Френеля, солнечный концентратор, вакуумный коллектор, паровая турбина.

Введение

Получение сухого и насыщенного пара для паровой турбины солнечной электростанции происходит посредством нагрева воды и последующего ее испарения за счет использования солнечных концентраторов, коллекторов, отражателей и нагревателей на базе линз Френеля. Выбор метода во многом зависит от географического расположения и требований, предъявляемых к установке.

На сегодняшний день в России солнечная энергетика не нашла широкого применения в процессах выработки электрической энергии за счет использования паровой турбины, вследствие чего отсутствуют данные, по которым можно было бы определить целесообразность использования различных методов для получения пара на определенной территории. Вследствие этого необходимо на основаниях экспериментальных исследований и теоретических расчетов провести анализ по выбору оптимального метода для получения пара за счет использования солнечной энергии на территории Российской Федерации.

Составлена классификация устройств, которые можно использовать в составе солнечной электростанции на паровой турбине (рис. 1).

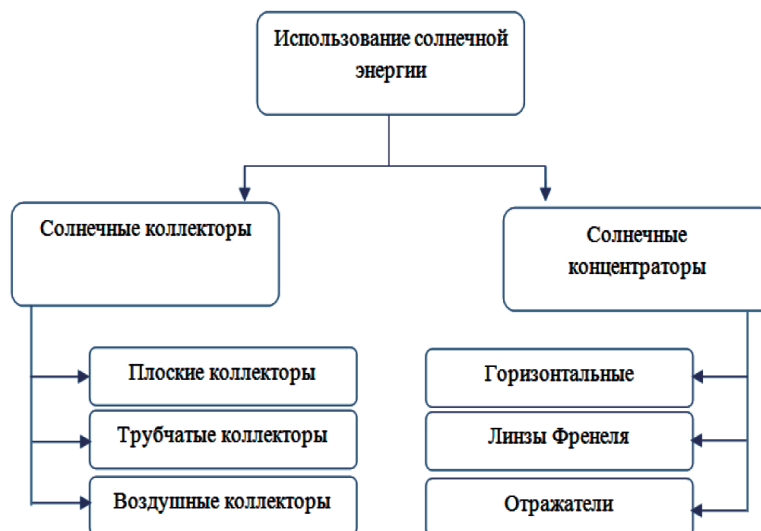


Рис. 1. Классификация методов преобразования солнечной энергии в тепловую энергию

Основная часть

Проведенный анализ и экспериментальные исследования солнечных опреснителей позволили предложить новый метод выработки электрической энергии, где в качестве источника тепловой энергии для солнечной электростанции используются вакуумные солнечные коллекторы (помимо известных устройств, работающих на солнечных концентраторах) в виде линз Френеля. Их основные технические характеристики приведены в таблице [1] – [4].

Технические характеристики солнечных концентраторов и коллекторов

Параметр Тип	Тепловая мощность, кВт	Площадь, м ²	Максимальная температура, °С	Вес, кг	КПД, %
Линзы Френеля (Solar Dish)	45	63	800	92	73
Трубчатые вакуумные коллекторы	40	32	250	66	80

Рассчитано, что для работы паровой турбины серии VAMAN компании *Mizun Consultant* (рис. 2) с генератором переменного тока мощностью 7,5 кВт, необходимо 42 кВт·ч тепловой энергии для выработки пара объемом 64 кг/ч, при 190 °С и при давлении 10,5 бар.

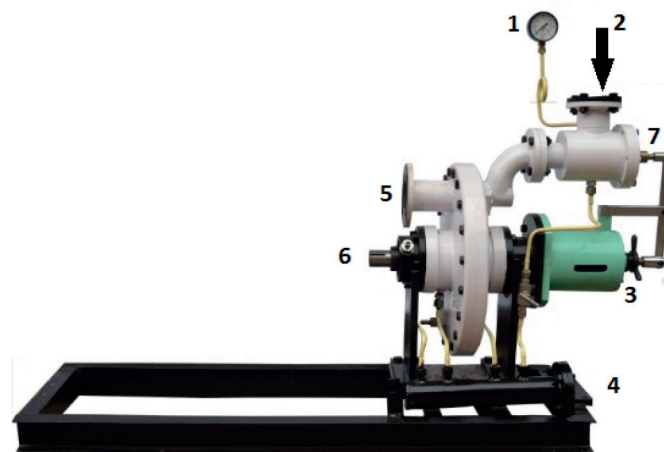


Рис. 2. Паровая турбина малой мощности:

1 — манометр; 2 — трубопровод подачи пара; 3 — регулятор скорости;
4 — трубопровод выхода конденсата; 5 — выпуск пара; 6 — приводной вал

Выявлено, что для получения 42 кВт·ч тепловой энергии потребуется три солнечных концентратора диаметром 6 м (рис. 3, а) или 400 трубок вакуумных солнечных коллекторов, имитация работы которых была проведена на разработанном стенде (рис. 3, б) [5].

а)



б)



Рис. 3. Солнечный концентратор в форме тарелки (линзы Френеля) — а; экспериментальный стенд выработки электрической энергии за счет использования солнечной энергии — б;

1 — солнечные коллекторы; 2 — опреснитель; 3 — циркуляционный насос; 4 — тепловая турбина и генератор; 5 — теплообменник

Представлены варианты использования солнечных коллекторов и концентраторов в составе солнечной электростанции (рис. 4).

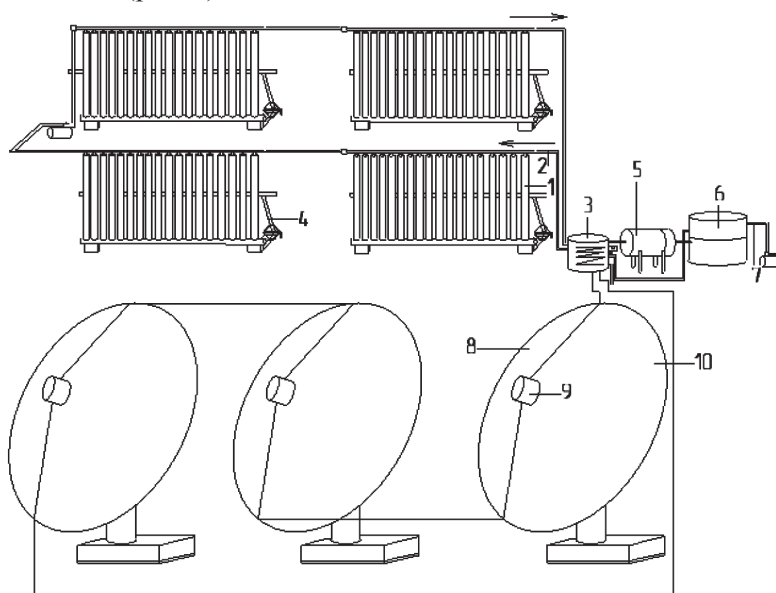


Рис. 4. Схема использования солнечных коллекторов и концентраторов в составе электростанции:

1 — солнечный коллектор; 2 — теплоноситель; 3 — теплообменник; 4 — система слежения за солнцем; 5 — паровая турбина; 6 — конденсатор; 7 — дистиллят; 8 — теплоноситель; 9 — теплообменник; 10 — солнечный концентратор

Принят следующий принцип действия солнечной электростанции: на начальном этапе за счет использования солнечных коллекторов и концентраторов происходит преобразование солнечной энергии в тепловую энергию, которая через теплоноситель передается в теплообменник, где происходит выработка пара и подача его в паровую турбину, откуда отработанный пар попадает в конденсатор.

Обсуждение основных результатов

Получена зависимость от времени количества трубок солнечных коллекторов и количество солнечных концентраторов года для выработки тепловой мощности порядка 42 кВт (рис. 5).

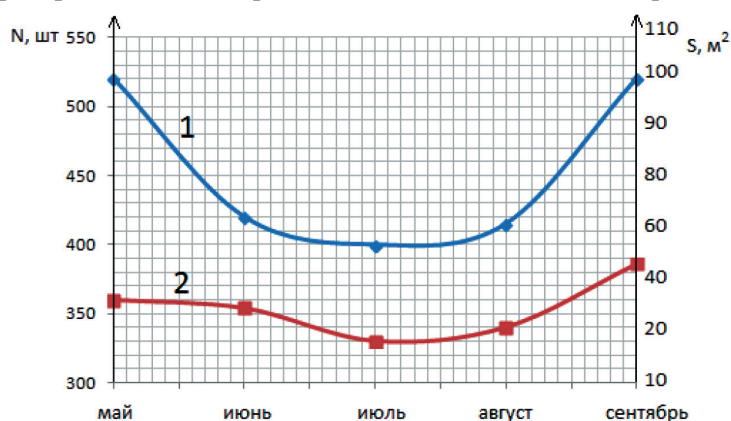


Рис. 5. Зависимость от времени года количества трубок солнечных коллекторов — 1 (N , шт.) и количество солнечных концентраторов — 2 (S , m^2) для выработки тепловой энергии 42 кВт·ч

Выявлено, что зависимость от времени года производительности солнечной электростанции при использовании солнечных коллекторов и использовании концентраторов имеет схожие характеристики. Производительность установки максимальна в летние месяцы, после чего начинает уменьшаться, что связано с уменьшением интенсивности солнечного излучения и уменьшением светового дня. Вследствие этого для поддержания заданной мощности требуется увеличение площади солнечных концентраторов и количества трубок вакуумного коллектора.

Солнечные концентраторы, несмотря на широкое применение в странах Северной Америки и Западной Европы, используется все же для узкого спектра задач, поэтому не производятся в промышленных масштабах для бытового потребителя. Стоимость известных образцов завышена и составляет от 1 170 000 руб. для мощности 7 кВт — в зависимости от производителя. При этом стоимость системы солнечных коллекторов составит 320 000 руб. без использования генератора.

Рассчитан период окупаемости солнечной электростанции мощностью 7,5 кВт при использовании солнечных коллекторов и концентраторов (рис. 6).

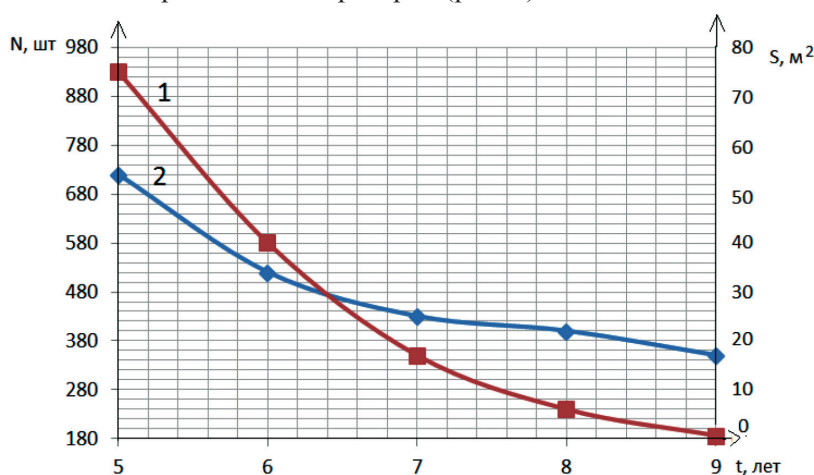


Рис. 6. Окупаемость установки при использовании солнечных коллекторов и концентраторов

Доказано, что окупаемость солнечной электростанции при использовании солнечных коллекторов превосходит солнечные концентраторы при работе в составе солнечной электростанции на 7,5 кВт, что связано с меньшей стоимостью системы преобразования солнечной энергии в тепловую. Однако при работе на большие мощности получена тенденция снижения срока окупаемости при использовании солнечных концентраторов, что связано с увеличением площади солнечного концентратора в два раза. Стоимость установки увеличивается в среднем в 1,5 раза, например, при использовании концентраторов фирмы *SolarSystem* [6]. Выявлена линейная зависимость увеличения стоимости системы выработки пара от ее мощности при использовании солнечных коллекторов в составе электростанции.

Известно, что солнечные концентраторы способны получать пар с температурой более 200 °С, на нем работают паровые генераторы мощностью более 50 кВт, для них использование солнечных коллекторов не представляется возможным [7] – [10].

Для работы солнечных концентраторов требуется система слежения за солнцем и безоблачная погода, так как рассеянное излучение, в отличие от вакуумных коллекторов, концентраторами не используется.

Выводы

При использовании солнечной электростанции с паровой турбиной мощностью 7,5 кВт, с температурой пара не более 190 °С, при давлении 5 Бар, с поступлением солнечной радиации в пределах 1000 – 1300 кВт·ч/м² в год для выработки пара рекомендуется использовать вакуумные солнечные коллекторы с коэффициентом поглощения $k_p > 0,94$ %, коэффициентом излучения $k_i < 0,06$ % и площадью не менее 0,08 м² в количестве от 400 штук, с общей площадью расположения солнечной электростанции 35 м² и с возможностью работы комплекса от 30 % при рассеянном солнечном излучении.

Доказано, что при использовании паровой турбины мощностью от 50 кВт целесообразно использовать солнечные концентраторы с коэффициентом мощности (power factor) $k_{pw} > 0,95$ % и гармоническим искажением < 5 %.

Доказано, что разработанную установку мощностью 7,5 кВт целесообразно использовать в регионах с дефицитом электрической энергии, в труднодоступных регионах, в местах экологических катастроф и на кораблях дальнего следования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирпичникова И. М. Опреснение воды с использованием энергий ветра и солнца / И. М. Кирпичникова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2012. — № 16. — С. 22–25.
2. Агамалиев М. М. Технология комбинированного опреснения морской воды с использованием вторичным энергоресурсов / М. М. Агамалиев // Энергосбережение и водоподготовка. — 2007. — № 4. — С. 14–16.
3. Рахматулин И. Р. Экспериментальные исследования влияния устройства слежения за солнцем на производительность солнечной опреснительной установки / И. Р. Рахматулин // Ползуновский вестник. — 2013. — № 4–2. — С. 168–171.
4. Кирпичникова И. М. Экспериментальные исследования лабораторного опреснителя воды / И. М. Кирпичникова, И. Р. Рахматулин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — № 1–2 (118). — С. 40–43.
5. Кирпичникова И. М. Использование паровой турбины в составе солнечной опреснительной установки / И. М. Кирпичникова, И. Р. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 57–61. DOI: 10.14529/power160307.
6. Рахматулин И. Р. Сравнительный анализ использования солнечного коллектора и солнечного концентратора для опреснения воды / И. Р. Рахматулин // Наука ЮУрГУ: матер. 65-й науч. конф. Секции технических наук: в 2 т. — Челябинск: изд. центр ЮУрГУ, 2013. — Т. 2. — С. 190–193.

7. Валамин А. Е. Теплофикационная паровая турбина Т-125/150-12.8 / А. Е. Валамин, А. Ю. Култышев, А. А. Гольдберг [и др.] // Теплоэнергетика. — 2014. — № 12. — С. 3. DOI: 10.1134/S004036361412008X.
8. Баринберг Г. Д. Теплофикационная паровая турбина Т-113/145-12,4 / Г. Д. Баринберг, А. Е. Валамин, Ю. А. Сахнин [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. — 2010. — № 11. — С. 38–41.
9. Ивановский А. А. Перспективы строительства ТЭЦ с паровыми турбина с противодавлением / А. А. Ивановский, А. Ю. Култышев, М. Ю. Степанов // Теплоэнергетика. — 2014. — № 12. — С. 37. DOI: 10.1134/S0040363614120030.
10. Чепурной М. Н. Энергетические характеристики газопаровых ТЭЦ с противодавленческими паровыми турбинами / М. Н. Чепурной, М. В. Бужинский // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2009. — № 2 (83). — С. 51–54.

EFFICIENCY OF SOLAR SYSTEMS IN POWER STATIONS FOR WORKING IN PLACES DEFICIT ENERGY AND SHIPS DEEPWATER

This paper described the problems of the deficit of electric energy problems in remote areas, in the areas of environmental disasters, ships long distance through the development of energy-efficient installation operating on renewable energy sources, compact size, and with the possibility of rapid installation. After development of a solar power plant stand and experimental studies, obtained thermal parameters for use with mini-steam turbine operating on steam at a temperature of more $t - 190$ C and a pressure of 5 bar. Description of the possibility of obtaining energy for power by converting solar energy into thermal energy by means of solar collectors and solar concentrators. The technical characteristics of the devices for converting solar energy into thermal energy. The analysis, based on which best methods are selected for the conversion of solar energy. The experimental stand with a new method of generating electric power by using solar thermal energy. Results of the steam turbine characteristics for operation in the solar power plant. Presented and described steam generation circuit. The results of produce for different times of the year when using various sizes of solar concentrator and the amount of vacuum collector tubes. On the basis of experimental studies and theoretical calculations for the first time the dependence payback station when using the hub and the collector region by using the installer. The regularities of payback from the installation area of solar concentrators and the number of vacuum tube collectors. The expediency of the use of solar collectors and solar concentrators as a part of the power plant for generating electrical energy from one set amount of 7.5 kW / h on the territory of the Russian Federation.

Keywords: solar power, Fresnel lenses, solar concentrator, vacuum tube, steam turbine.

REFERENCES

1. Kirpichnikova, Irina Mikhailovna. "Water desalination with the use of wind and solar energy." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 16 (2012): 22–25.
2. Agamaliyev, M. M. "Tehnologija kombinirovannogo opresneniya morskoy vody s ispolzovaniem vtorichnym jenergoresursov." *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka* 4 (2007): 14–16.
3. Rahmatulin, I. R. "Jeksperimentalnye issledovaniya vlijanija ustrojstva slezhenija za solncem na proizvoditelnost solnechnoj opresnitelnoj ustanovki." *Polzunovskij vestnik* 4-2 (2013): 168–171.
4. Kirpichnikova, I. M., and I. R. Rakhmatulin. "Experimental researches of laboratory water desalinators." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 1-2 (118) (2013): 40–43.
5. Kirpichnikova, I. M., and I. R. Rakhmatulin. "Steam turbine in solar desalination plant." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 16.3 (2016): 57–61. DOI: 10.14529/power160307.
6. Rahmatulin, I. R. "Sravnitelnyj analiz ispolzovaniya solnechnogo kollektora i solnechnogo koncentratora dlya opresneniya vody." *Nauka YUUrGU: materialy 65-j nauchnoj konferencii. Sekcii tekhnicheskikh nauk: v 2 t.* Chelyabinsk: Izdatelskij centr YUUrGU, 2013. T. 2. 190–193.
7. Valamin, A. E., A. Yu. Kultyshev, A. A. Gol'dberg, Yu. A. Sakhnin, V. N. Bilan, M. Yu. Stepanov, E. N. Polyaeva, M. V. Shekhter, and T. L. Shibaev. "The T-125/150-12.8 cogeneration steam turbine." *Thermal Engineering* 61.12 (2014): 849–856. DOI: 10.1134/S0040601514120076.
8. Barinberg, G. D., A. E. Valamin, Ju. A. Sahnin, A. A. Ivanovskij, A. Ju. Kultyshev, and V. B. Novoselov. "Teplofikacionnaja parovaja turbina T-113/145-12,4." *Nadezhnost i bezopasnost jenergetiki* 11 (2010): 38–41.

9. Ivanovskii, A. A., A. Yu. Kultyshev, and M. Yu. Stepanov. "Prospects for constructing cogeneration stations equipped with back-pressure steam turbines." *Thermal Engineering* 61.12 (2014): 880–883. DOI: 10.1134/S0040601514120039.

10. Cherpurnyy, M. M., and M. V. Buzhyns'kyi. "Energy characteristics of gas-steam heating plants with back-pressure steam turbines." *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute* 2(83) (2009): 51–54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рахматулин Ильдар Рафикович —
кандидат технических наук.
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»
ildar.o2010@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rakhmatulin Ildar Rafikovich — PhD.
FGAOU IN "South Ural State
University (NIU)"
ildar.o2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2016 г.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-221-227

УДК 621.398.04

А. А. Чертков,
Д. А. Загребин,
Ю. Б. Михайлов

АЛГОРИТМ НАБЛЮДАТЕЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ШУМОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы состоит в улучшении качественных показателей удержания судна на курсе — повышении точности и надежности управления судном по отношению к возмущениям угла крена, угловой скорости вращения и шумов измерений, требующих компромиссных решений, связанных с выбором быстродействия системы и точности оценки вектора состояния. В реальных условиях вектор состояния не всегда доступен для измерения. Не менее сложной задачей является измерение возмущений, которые приводят к появлению дополнительных составляющих ошибки оценки переменных состояния и снижают точность управления. Для реализации системы в реальном времени оценки должны производиться с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Рассматривается метод синтеза динамического наблюдателя полной размерности (наблюдателя Калмана), отличающийся тем, что он позволяет уменьшить погрешность оценки переменных состояния судового объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, путем построения модели состояния расширенной системы «объект – среда». Оценка производится на основе алгоритмов линеаризации нелинейных моделей в пространстве состояния с использованием оптимальной фильтрации, инструментария матричной лаборатории и компьютерных технологий. Приведен пример расчета трехмерного динамического наблюдателя для оценки векторов возмущений и шумов измерений, выполненного на основе предложенного алгоритма. Результаты расчета переменных состояния и возмущений, полученные с использованием канонических форм уравнений состояния, соответствуют оптимальным (по быстродействию) переходным процессам в рассматриваемых моделях судового объекта при переводе его из начального состояния в установившееся состояние за минимальное время.

Ключевые слова: судно, модель, управление, наблюдатель, матрица, векторы выхода и состояния, модальный метод, алгоритм, синтез.

Введение

Современные системы судовождения, их технические средства характеризуются высокой размерностью и сложностью. Для обеспечения целенаправленного управления судовыми динамическими системами требуется получение достоверной информации о переменных состояния. Обеспечение заданной точности и надежности управления судном по отношению к возмущениям угла курса, угла крена или угловой скорости вращения требует компромиссных решений, связанных с выбором быстродействия системы и точности оценки вектора состояния. Вектор состояния не всегда доступен для измерений. В реальных условиях измерение вектора состояния, как правило, затруднено из-за необходимости установки датчиков в труднодоступных местах, измерения производных высоких порядков и т. д. Не менее сложной задачей является измерение возмущений, которые приводят к появлению дополнительных составляющих ошибки оценивания переменных состояния и снижают точность управления.

Для измерений переменных состояния и возмущений наряду с инструментальными могут быть предложены математические датчики информации, построенные на динамических наблюдателях и оценщиках. Уменьшить влияние возмущений можно, если выполнять, наряду с оцениванием состояния объекта, также идентификацию неизмеряемых внешних воздействий. В системах управления наиболее распространены оценки типа «фильтрация». В системах реального вре-

мени оценки целесообразно производить с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Проблеме конструирования динамических наблюдателей состояния как линейных, так и нелинейных систем уделяется большое внимание в отечественной [1] – [5] и зарубежной [6] – [8] литературе. 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 [9].

В современной теории управления существует ряд эффективных методов решения этой проблемы [1], [2], [5], [10] – [12]. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для оценки векторов возмущений и шумов измерений на конкретном объекте имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе их синтеза [13] – [15].

Основная часть

Процедура синтеза наблюдателей для оценки возмущений и помех состоит в следующем. Сначала выбирается модель управляемого объекта с возмущениями, которые интерпретируются решениями дифференциальных уравнений с изменяющимися начальными условиями, что позволяет косвенно оценить влияние внешних воздействий. С учетом полученных оценок формируется модель внешних воздействий, которая вводится в состав расширенной динамической системы (объект, внешние возмущения), для которой строится наблюдатель. Полученные с его помощью оценки содержат как собственно оценки состояния объекта, так и оценки внешних воздействий.

В тех случаях, когда внешние воздействия моделируются рядами, состоящими из многочленов вида

$$\sum_{i=1}^N e^{\lambda_i t} P_i(t),$$

где $\lambda_i \in \Lambda$ — известные постоянные; $P_i(t)$ — многочлены с заданными коэффициентами, процедура синтеза наблюдателя значительно упрощается. Упрощение обеспечивается за счет того, что такие модели представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, для которых, например, в системе MatLab содержатся функции, допускающие объектно-ориентированное программирование операций определенного класса.

Рассмотрим алгоритм оценивания внешних воздействий для модели объекта, заданной уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + f(t); \\ y(t) = C(t)x(t) + v(t), \end{cases} \quad (1)$$

при начальных условиях $x(t_0) = x_0$, $t \geq t_0$. Здесь $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы управления и выхода; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ — матрицы линейной нестационарной системы; $f(t)$, $v(t)$ — воздействующие на объект соответственно внешние возмущения и шум (погрешность) измерений. В процессе синтеза наблюдателя выполняются измерения $u(t)$, $y(t)$, неизмеряемыми переменными являются $x(t)$, $f(t)$, $v(t)$.

Представим внешние воздействия $f(t)$, $v(t)$ в виде выходных процессов линейной системы, заданной в пространстве состояний уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c(t)x_c(t); \\ y_c(t) = C_c(t)x_c(t); \quad x_c(t_0) = x_{c0}, \quad t \geq t_0, \end{cases} \quad (2)$$

где $x_c(t)$ — вектор состояния среды размерности $(n_c \times 1)$; $y_c(t)$ — вектор выхода модели внешних возмущений размерности $(n_c + l) \times 1$. Заметим, что $y_c(t) = \text{col}\{f(t), v(t)\}$. A_c , C_c — известные матрицы. Составная матрица

$$C_c = \begin{bmatrix} C_f \\ C_v \end{bmatrix}$$

содержит подматрицу C_f размерности $(n \times n_c)$ и подматрицу C_v размерности $(l \times n_c)$, которые определяют связь $x_c(t)$ и $f(t)$ с помехами $v(t)$ в (1). В системе (2) вектор начальных состояний x_{c0} также неизвестен.

Введем расширенный («совокупный») вектор состояния системы «объект – среда»

$$\bar{x}(t) = [x(t), x_c(t)] \in R^{n \times n_c}.$$

Объединив уравнения (1) и (2), получим уравнения расширенной системы в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}(t)\bar{x}(t) + \bar{B}u(t); \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}(t)\bar{x}(t); \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0, \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Матрицы состояния, управления и выхода этой системы имеют вид:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & C_f \\ 0_{n_c \times n} & A_c \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{n_c \times m} \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [C \quad C_v].$$

Видно, что для динамической системы (3) размерности $\bar{n} = n + n_c$ может быть предложен наблюдатель со следующей структурой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\bar{x}}}(t) = \bar{A}(t)\hat{\bar{x}}(t) + \bar{B}(t)u(t) + L(t)(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = \bar{C}(t)\hat{\bar{x}}(t); \quad \hat{\bar{x}}(t_0) = \hat{\bar{x}}_0, \quad t \geq t_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{\bar{x}}(t) \in R^n$ — вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния системы «объект – среда»; $\hat{y}(t) \in R^l$ — вектор выхода наблюдателя, служащий оценкой выхода расширенной системы объекта и среды; $L(t)$ — матрица размерности $[n \times l]$ коэффициентов обратной связи по невязке между выходами расширенной системы и наблюдателя.

Для демонстрации эффективности работы алгоритма рассмотрим процедуру оценки влияния возмущения на примере упрощенной модели судна:

$$I_x \frac{d^2\theta}{dt^2} = u(t) + M(t), \quad (5)$$

где I_x — момент инерции судна относительно продольной оси; $\theta(t)$ — угол крена судна; $u(t)$, $M(t)$ — управляющий и возмущающий моменты. Если вектор $u(t)$ известен, угловая скорость крена $\omega_x(t) = \dot{\theta}(t)$ доступна для измерений, то оценке подлежит возмущающий момент $M(t)$.

Для переменной $M(t)$, являющейся линейной функцией

$$M(t) = M_0 + vt$$

с неизвестными M_0 и v , предлагается модель

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = v(t); \\ \dot{v}(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

с неизвестными начальными условиями $M(0)$ и $v(0)$, на основе которой в работе получено уравнение состояния вида (3) с матрицами $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1/I_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 1/I_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [1 \quad 0 \quad 0]. \quad (7)$$

Для системы (5) получен наблюдатель (4), в котором модель (6) имеет размерность $n = 3$. Заметим, что в наблюдателе переменные состояния $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ являются, по сути, оценками переменных $\omega_x(t)$, $M(t)$, $v(t)$ соответственно. С учетом размерности системы характеристический многочлен наблюдателя с собственными числами матрицы A_n будет иметь вид [16]:

$$\det(sI_3 - A_n) \equiv (sI_3 - A + LC) = s^3 + l_1 s^2 + \frac{l_2}{I_x} s + \frac{l_3}{I_x}.$$

Далее, используя стандартную форму представления характеристического многочлена наблюдателя с помощью полинома Баттерворта третьего порядка, т. е. осуществляя биномиальную фильтрацию

$$\det(sI_3 - A_n) = s^3 + 2\Omega_0 s^2 + 2\Omega_0^2 s + \Omega_0^3,$$

находим неизвестные коэффициенты характеристического многочлена:

$$l_1 = 2\Omega_0, l_2 = 2I_x \Omega_0^2, l_3 = I_x \Omega_0^3.$$

Согласно выбранному многочлену Баттерворта, параметр Ω_0 задает быстродействие системы. Время переходного процесса t_p можно оценить по формуле $t_p = 5/\Omega_0$. Полученный наблюдатель представим системой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_x(t) = -l_1 \hat{\omega}_x(t) + \hat{M}(t)/I_x + l_1 \omega_x(t) + u(t)/I_x; \\ \dot{\hat{M}}(t) = -l_2 \hat{\omega}_x(t) + \hat{v}(t) + l_2 \omega_x(t); \\ \dot{\hat{v}}(t) = -l_3 \hat{\omega}_x(t) + l_3 \omega_x(t). \end{cases} \quad (8)$$

Результаты моделирования системы (8) в среде MatLab представлены на рис. 1 и 2 (сплошная линия).

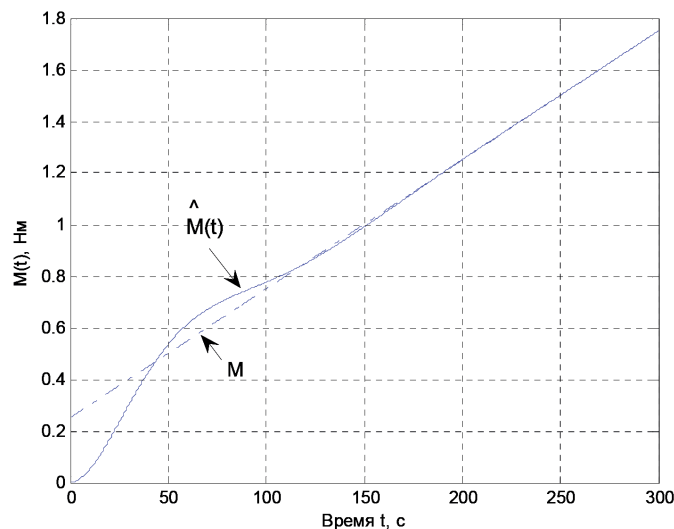


Рис. 1. Переходный процесс оценивания возмущений в обобщенной системе

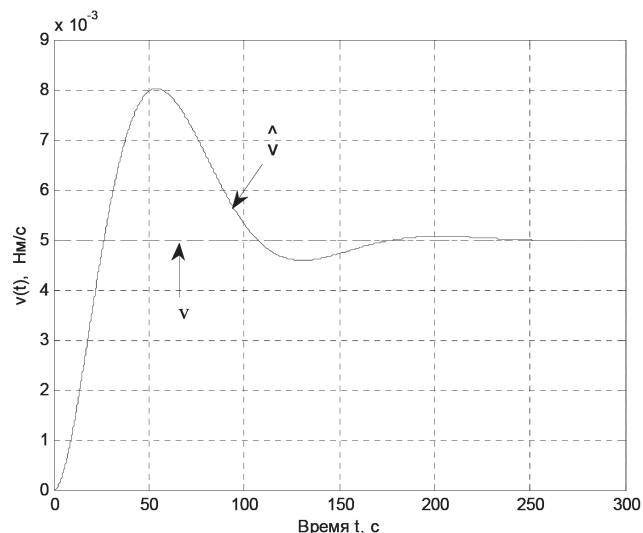


Рис. 2. Переходный процесс оценивания шумов измерений

Из графиков видно, что время переходного процесса в наблюдателе составляет не более 100 с. Параметры моделируемой системы: $I_x = 1000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M(0) = 0,25 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $v(0) = 5\cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$; $\Omega_0 = 0,05 \text{ 1/с}$. На графиках показаны моменты переключения, отражающие специфику объекта, из которых следует, что время переходного процесса зависит от численных значений параметров модели, а также от установившихся значений переменных состояния.

Выводы

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритма наблюдателя полной размерности с использованием модели расширенной системы «объект – среда», что позволяет получить оценки векторов возмущений и шумов измерений по доступным измерениям вектору выхода — угловой скорости крена. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

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 линейной модели наблюдателя устойчивость гарантируется обоснованным выбором характеристического многочлена наблюдателя — многочлена Баттерворта третьего порядка, корни которого несущественно отличаются 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 расширенной системы наблюдателя путем введения векторов $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ позволяет предложить способ мониторинга датчиков угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. 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.

Предложенный алгоритм численной оценки вектора состояний средствами математического программирования может эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме. Алгоритмы оптимизации судовых объектов и систем средствами математического программирования содержат модели динамических объектов в форме уравнений в пространстве состояний, которые образуют систему ограничений на каждом шаге итерационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А. Е. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна / А. Е. Сазонов, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
2. 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.
3. Чертков А. А. Синтез наблюдателя на основе фильтра Калмана для системы управления динамическим объектом / А. А. Чертков // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2014. — № 1 (12). — С. 66–71.
4. Андриевский Б. Р. Анализ систем в пространстве состояний / Б. Р. Андриевский. — СПб.: ИПМаш РАН, 1997. — 206 с.
5. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.

6. Lewis F. L. Optimal Control / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. — 3rd ed. — N. Y.: John Wiley and Sons, 2012. — 541 p.
7. 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.
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. 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.
10. Гринкевич Я. М. Наблюдатели и оценщики состояния в судовых системах управления / Я. М. Гринкевич, В. В. Сахаров. — СПб.: СПГУВК, 2001. — 193 с.
11. Садков А. В. Моделирование динамики водоизмещающего речного судна, неустойчивого на курсе / А. В. Садков // Морской Вестник. — 2012. — № 3. — С. 94–96.
12. 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.
13. Митряшкин Ю. В. Линейные модели управляемых динамических систем / Ю. В. Митряшкин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — Ч. 1. Уравнения «вход – выход» и «вход – состояние – выход»: учеб. пособие. — 222 с.
14. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. — 655 с.
15. Гофман А. Д. Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 150 с.
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.

ALGORITHM OF SHIP COURSE CONTROL SYSTEM WATCHER FOR ASSESSING DISTURBANCES AND NOISE MEASUREMENTS

The aim of this work is to improve the quality of indicators hold vessel on course — improving the accuracy and reliability of ship management in relation to disturbance bank angle, the angular velocity of rotation and noise measurements that require trade-offs related to the choice of system performance and accuracy evaluation of vector State. In the wild state vector is not always available for measurement. No less challenging is the measurement of disturbances that lead to the emergence of additional components error estimation of state variables and reduce the accuracy of the control. For the implementation of the system in real time assessment shall be carried out using methods and computational stochastic procedures and, in particular, binomial filter.

The method of synthesis of dynamic observer full dimension (Kalman observer) that is different in that it allows you to reduce the error of estimate the state variables of the channel object, functioning in the face of changing external Wednesday, by constructing a model of the extended status object system Wednesday. Score is based on algorithms of linearization of nonlinear state-space models using optimal filtration, laboratory matrix instrumentation and computer technology. An example of the calculation of the three-dimensional dynamic observer to evaluate the perturbation vectors and noise measurements made on the basis of the proposed algorithm. The results of calculation of state variables and perturbations produced using canonical forms of State equations correspond to the best (performance) the transitional processes in the ship models of the object when translating it from the initial state in the settled State in the shortest possible time.

Keywords: ship model, control, the observer, the matrix, vectors and exit a modal method, algorithm synthesis.

REFERENCES

1. Sazonov, Anatoliy Efimovich, Vladimir Vasilevich Saharov, and Alexandr Alexandrovich Chertkov. “A modal method for the synthesis of an observer for heading control.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta*

morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 4(38) (2016): 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.

2. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. “Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control.” *Vestnik gosudarstvennogo universitetaorskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.

3. Chertkov, A. “Synthesis of the observer on the basis of filter Kalmana to control system of dynamic object.” *Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo* 1(12) (2014): 66–71.

4. Andrievskij, B. R. *Anmaliz system v prostranstve sostojanija*. SPb.: IPMash RAN, 1997.

5. Andrievskij, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlenija s primerami na jazyke MatLab*. SPb.: Nauka, 2000.

6. Lewis, F. L., D. Vrabie, and V. L. Syrmos. *Optimal Control*. 3rd ed. N.Y.: John Wiley and Sons, 2012.

7. 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.

8. Dhaliwal, S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems. Master thesis. Ontario, Canada: Queen’s University Kingston, 2011.

9. 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.

10. Grinkevich, Ja. M., and V. V. Saharov. *Nabludateli i ocenivateli sostojanija v sudovyh sistemah upravlenija*. SPb.: SPGUWK, 2001.

11. Sadkov, A. V. “Modeling the dynamics of displacement river boat which is course-unstable.” *Morskoy Vestnik* 3 (2012): 94–96.

12. 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.

13. Mitrjashkin, Ju. V. *Linejnye modeli upravljajemyh dinamicheskikh sistem. Chast I. Uravnenija «vhod — vyhod» i «vhod — sostojanie — vyhod»: uchebnoe posobie*. M.: izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008.

14. Pupkov, K. A., and N. D. Egupov. *Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. Tom I. Matematicheskie modeli, dinamicheskie harakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravlenija*. M.: izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2004.

15. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.

16. Veremey, E. I., V. M. Korchanov, M. V. Korovkin, and S. V. Pogojev. *Kompjuternoe modelirovanie sistem upravlenija dvizheniem morskikh podvijnyh ob’ektov*. SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —

кандидат технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

chertkov51@mail.ru

Загредин Денис Алексеевич — аспирант.

Научный руководитель:

Сахаров Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова

kaf_electricalautomatic@gumrf.ru

Михайлов Юрий Борисович — аспирант.

Научный руководитель:

Сахаров Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

yuar640@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov Alexandr Alexandrovich —

PhD, associate professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

chertkov51@mail.ru

Zagredinov Denis Alekseevich — postgraduate.

Supervisor:

Saharov Vladimir Vasilevich —

Dr. of Technical Sciences, professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

kaf_electricalautomatic@gumrf.ru

Mihaylov Jurij Borisovich — postgraduate.

Supervisor:

Saharov Vladimir Vasilevich —

Dr. of Technical Sciences, professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

yuar640@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 октября 2016 г.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОРСКОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В статье рассматривается задача слежения за маневрирующим объектом распределённой морской системой наблюдения (PMCH), предполагающая интеграцию больших объемов разнохарактерной информации. Главное предназначение таких систем состоит в обеспечении условий навигации, мониторинге обстановки, спасении жизни людей в различных ситуациях. PMCH можно рассматривать как распределённую компьютерную систему, включающую набор сервисных подсистем для различных групп и уровней пользователей. Такая система высокого уровня базируется на данных ряда существующих морских информационных систем (AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS). Важнейшую проблему при разработке таких систем представляют вопросы интеграции информации, поступающей в различной форме от различных источников, и вопросы учета ограничений типа неравенств, отражающих особенности акватории. При этом даже при наличии больших объемов входных данных серьезные сложности для алгоритмов слежения вызывают глухие участки в последовательностях наблюдений продолжительностью от минут до часов. Аналитические решения здесь возможны только в узком классе моделей эволюции, измерений и экзогенной информации.

В работе рассмотрены подходы к слиянию информации от различных источников при оценивании координат и параметров движения подвижного объекта в системе виртуальных сценариев его поведения. Предложены новые конструкции фильтров, основанные на возможностях выборочного представления апостериорной плотности распределения оценки. Предлагается общий сценарный подход для последовательного анализа ситуационных гипотез, основанный на синтезе аналитической техники и процедур компьютерного моделирования. На выходе фильтра на каждом шаге появляется векторная выборка, интерпретируемая как выборка из апостериорного распределения, которой можно распорядиться различными способами. Например, апостериорная вероятность попадания в некоторую зону может оцениваться как доля выборочных значений, попавших в эту зону, точечная оценка — как одна из характеристик центра и т. д.

Ключевые слова: слежение за маневрирующим объектом, слияние данных, пропуски в данных, распределённая система наблюдения, интеллектуальные геоинформационные системы.

Введение

Основной целью распределённой морской системы наблюдения (PMCH) является обеспечение навигационной поддержки, поддержки спасательных операций и мониторинг обстановки в различных акваториях и в открытом море. PMCH можно рассматривать как разнородную распределённую компьютерную систему, основанную на интеграции данных спутниковых и морских подсистем (AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS) и обеспечивающую ряд сервисных функций как на глобальном уровне, так и на уровне корабля, акватории, региона. Важнейшую проблему при разработке таких систем представляют вопросы интеграции информации, поступающей от различных источников, и вопросы учета ограничений типа неравенств, отражающих особенности акватории. Данные аспекты рассмотрены, например, в монографии Я. И. Ивакина [1].

В настоящей работе для задач этого класса предлагается общий подход последовательного анализа ситуационных гипотез (сценариев), основанный на синтезе аналитической техники и процедур компьютерного моделирования.

Постановка задачи интеграции информации в PMCH

В регионе функционируют PMCH, включающая N источников информации и орган управления. В качестве источников информации об обстановке используются:

– распределенные в пространстве средства мониторинга (подвижные и неподвижные), которые имеют различные возможности по регистрации объектов мониторинга, измерения их координат и параметров движения, а также по интенсивности выдачи информации в орган управления;

– другие распределенные системы наблюдения, данные от которых поступают дискретно в интегрированном виде.

Данные от i -го средства мониторинга или k -й распределенной системы ($i \in N, k \in N$) после обработки передаются на орган управления РМСН в виде дискретных сообщений, каждое из которых относится к одному, j -му объекту ($j = 1, \dots, M$; M — количество объектов, действующих в районе функционирования системы). Каждое сообщение можно представить в виде вектора

$$C_{ij} = [i \ j \ K_{ij} \ \varphi_{ij} \ \lambda_{ij} \ h_{ij} \ k_{ij} \ v_{ij} \ P_{ij} \ t_{ij}], \quad (1)$$

где i — номер источника информации; j — номер объекта, присвоенный i -м источником информации; K_{ij} — класс объекта мониторинга; φ_{ij} — широта местоположения объекта; λ_{ij} — долгота местоположения объекта; h_{ij} — высота (глубина) нахождения объекта; k_{ij} — курс объекта; v_{ij} — скорость объекта; P_{ij} — другие признаки объекта, которые могут выдаваться средством мониторинга, например признак новизны, признак маневра объекта, признак потери объекта и т. д.; t_{ij} — время получения информации (может отличаться от времени получения сообщения).

Для всех i, j известны ковариационные матрицы, описывающие неопределенность оценки координат j -го объекта i -м источником:

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & K_{xy} \\ K_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где σ_x^2, σ_y^2 — дисперсии оценок местоположения объекта по осям x и y соответственно; K_{xy} — ковариации этих оценок.

Орган управления системой мониторинга располагает дополнительными сведениями, характеризующими обстановку в районе и влияющими на процесс обработки информации:

- о местах расположения элементов системы мониторинга;
- о характеристиках средств мониторинга (дальность обнаружения объектов различных классов, разрешающая способность, мертвые зоны и т. п.);
- об инфраструктуре района (фарватеры, судоходные пути, навигационное оборудование и т. п.);
- о гидрометеорологической обстановке;
- о ледовой обстановке;
- о промысловой обстановке.

Эти дополнительные сведения позволяют выдвигать ситуационные гипотезы, которые формализуются в виде экзогенных байесовских распределений, формируемых последовательно по мере поступления сообщений.

Задачами интеграции информации от различных средств мониторинга и других распределенных систем в РМСН являются:

- а) расчет и построение областей возможного местоположения объектов мониторинга;
- б) экстраполяция местоположения выделенного объекта на определенный момент времени;
- в) отождествление и отображение трасс объектов, сопровождаемых элементами системы наблюдения.

Рекурсивное байесовское оценивание в рестриктивной постановке

Задача трассового анализа, поставленная в [1], представляет собой один из вариантов задачи рекурсивного нелинейного оценивания, описанной в [2]; наиболее распространенным подходом в ней является использование расширенного фильтра Калмана. Проблема подвергается линеаризации в окрестности прогнозного значения, и искомая плотность аппроксимируется гауссовой плотностью, что может не соответствовать реальной структуре данных и, в частности, приводить

к расходимости. Другие аналитические подходы основаны на аппроксимации первых двух моментов плотности и рассмотрены, например, в [3], [4]. Более прямой, численный подход, использованный в [5], основан на оценке плотности в узлах решетки в пространстве состояний, при этом в многомерном пространстве приходится производить расчеты для слишком большого числа узлов, что требует значительных вычислительных мощностей для каждого узла.

Предполагается, что вектор состояния $x_k \in R^n$ эволюционирует в соответствии с моделью динамики

$$x_{k+1} = f_k(x_k, w_k), \quad (3)$$

где $f_k: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ — переходная функция системы, а $w_k \in R^m$ — последовательность погрешностей с нулевым средним, независимая от прошлых и будущих значений вектора состояний. Вероятностная плотность w_k предполагается известной. В условиях дискретного времени имеются измерения $y_k \in R^p$, связанные со значениями вектора состояний уравнением наблюдений

$$y_k = h_k(x_k, v_k),$$

где $h_k: R^n \times R^r \rightarrow R^p$ — переходная функция измерений, а $v_k \in R^r$ — другая последовательность с нулевым средним и известной вероятностной плотностью, независимая от прошлых и будущих состояний и шума системы. Предполагаются известными начальная плотность вектора состояний и функции $f_i, h_i, i = 1, \dots, k$.

Экзогенная информация, основанная на текущей тактической ситуационной гипотезе, в большинстве случаев формализуется как равномерное распределение в некотором многоугольнике U_k , независимое от прошлых и будущих состояний и шума системы. Соответствующую плотность обозначим $u_k(x_k)$.

Таким образом, на шаге k доступная информация представлена в виде последовательности измерений $\{y_i\}$ и экзогенной плотности $u_k(x_k)$: $D_k = \{y_i, i = 1, \dots, k, u_k(x_k)\}$. Задача состоит в получении оценок плотности вектора состояний $p(x_k | D_k)$, основанной на всей информации, доступной к моменту k . Этот процесс осуществляется рекуррентно в две стадии: прогноз и обновление.

Предположим, что искомая плотность $p(x_{k-1} | D_{k-1})$ на шаге $k-1$ уже получена. Тогда, используя модель динамики системы, можно получить априорную плотность в виде

$$p(x_k | D_{k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | D_{k-1}) dx_{k-1}.$$

Вероятностная модель эволюции вектора состояний $p(x_k | x_{k-1})$ является марковской и определяется системой уравнений

$$p(x_k | x_{k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}, w_{k-1}) p(w_{k-1} | x_{k-1}) dw_{k-1}.$$

В силу предположения $p(w_{k-1} | x_{k-1}) = p(w_{k-1})$, имеем

$$p(x_k | x_{k-1}) = \int \delta(x_{k-1} - f_{k-1}(x_{k-1}, w_{k-1})) p(w_{k-1}) dw_{k-1},$$

где $\delta(\cdot)$ — дельта-функция Дирака. Дельта-функция возникает при условии, если x_{k-1} и w_{k-1} неизвестны, то оценка x_k получается из детерминированного соотношения (3). На шаге k становятся доступными измерение y_k и экзогенное распределение $u_k(x_k)$, которые используются для обновления априорного распределения вектора состояний на основе байесовского правила

$$p(x_k | D_k) = \frac{p(y_k | x_k) p(x_k | D_{k-1}) u_k(x_k)}{p(y_k | D_k)}, \quad (4)$$

где нормализующий множитель определяется соотношением

$$p(y_k | D_k) = \int p(y_k | x_k) p(x_k | D_{k-1}) u_k(x_k) dx_k. \quad (5)$$

Условная плотность y_k при данных x_k , $p(y_k | x_k)$ определяется моделью измерений и известным распределением статистики v_k :

$$p(y_k | x_k) = \int \delta(y_k - h_k(x_k, v_k)) p(v_k) dv_k. \quad (6)$$

В уравнении (4) измерение y_k и плотность u_k используются для коррекции прогноза предыдущего шага и получения апостериорного распределения вектора состояний.

Уравнения (4) и (6) дают формальное решение задачи рекуррентного байесовского оценивания. Аналитическое решение здесь возможно только в узком классе моделей эволюции, измерений и экзогенной информации. Наиболее важным является случай, когда f_k и h_k линейны, w_k и v_k представляют собой аддитивные гауссовы шумы с известными ковариационными матрицами, а плотности u_k являются гауссовыми, хотя для многих приложений эти постановки оказываются неадекватными.

Рестриктивный байесов бутстрэп-фильтр

Предположим, что имеется набор независимых реализаций случайного вектора

$$\{x_{k-1}(i), i = 1, \dots, N\},$$

подчиняющихся распределению $p(x_{k-1} | D_{k-1})$. Бутстрэп-фильтр, основанный на подходе, предложенном в [6], [7], представляет собой алгоритм, позволяющий получать на их основе набор независимых реализаций $\{x_k(i), i = 1, \dots, N\}$, приближенно подчиняющихся распределению $p(x_k | D_k)$. Такой фильтр представляет собой механизм, приближенно эмулирующий соотношения (3) – (4).

Прогноз: каждая выборочная реализация преобразуется по формуле

$$x_k^*(i) = f_k(x_{k-1}(i), w_{k-1}(i)), i = 1, \dots, N,$$

где $w_{k-1}(i)$ — выборочные реализации случайного вектора с распределением $p(w_{k-1})$.

Таким образом, в соответствии с уравнениями (4) – (6), $x_k^*(i)$ — векторная выборка, соответствующая распределению $p(x_k | D_{k-1})$.

Обновление: на основе измерения y_k строим функцию правдоподобия и получаем весовые коэффициенты для каждой реализации:

$$q_i = \frac{p(y_k | x_k^*(i)) \cdot u_k(x_k^*(i))}{\sum_{j=1}^N p(y_k | x_k^*(j)) \cdot u_k(x_k^*(j))}. \quad (7)$$

Так определяется дискретное распределение на множестве точек $\{x_k^*(i), i = 1, \dots, N\}$ с вероятностной массой q_i в i -й точке. Один из промежуточных этапов эволюции множества точек $\{x_k^*\}$ приведен на рис. 1.

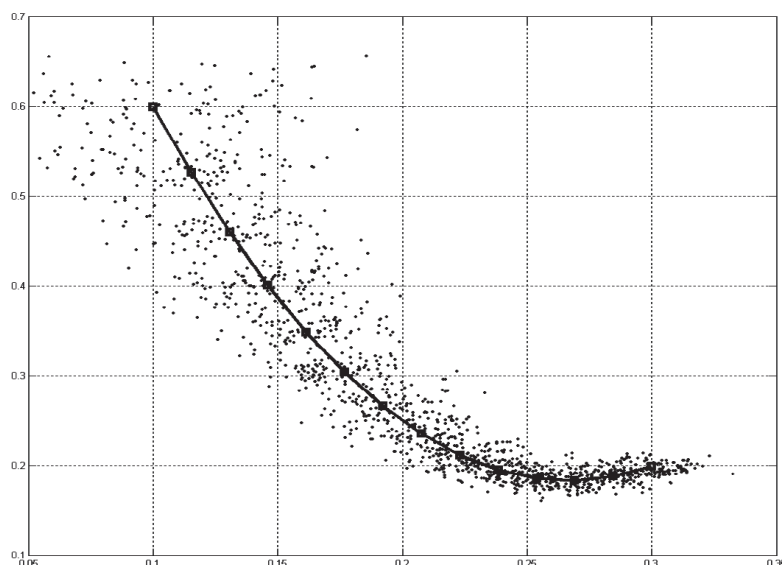


Рис. 1. Пример: траектория маневрирующего объекта и ее бутстрэп-оценка

Построим N случайных реализаций из этого дискретного распределения и сгенерируем выборку $\{x_k(i), i = 1, \dots, N\}$ так, что для любых i, j

$$P\{x_k(i) = x_k^*(i)\} = q_i.$$

Эти процедуры прогноза и обновления составляют один k -й шаг итерации. На первом шаге процесс инициализируется N реализациями случайного вектора с известным распределением $p(x_1)$.

Пример эволюции такой последовательности распределений приведен на рис. 2, при этом для наглядности представлены их гауссовы аппроксимации.

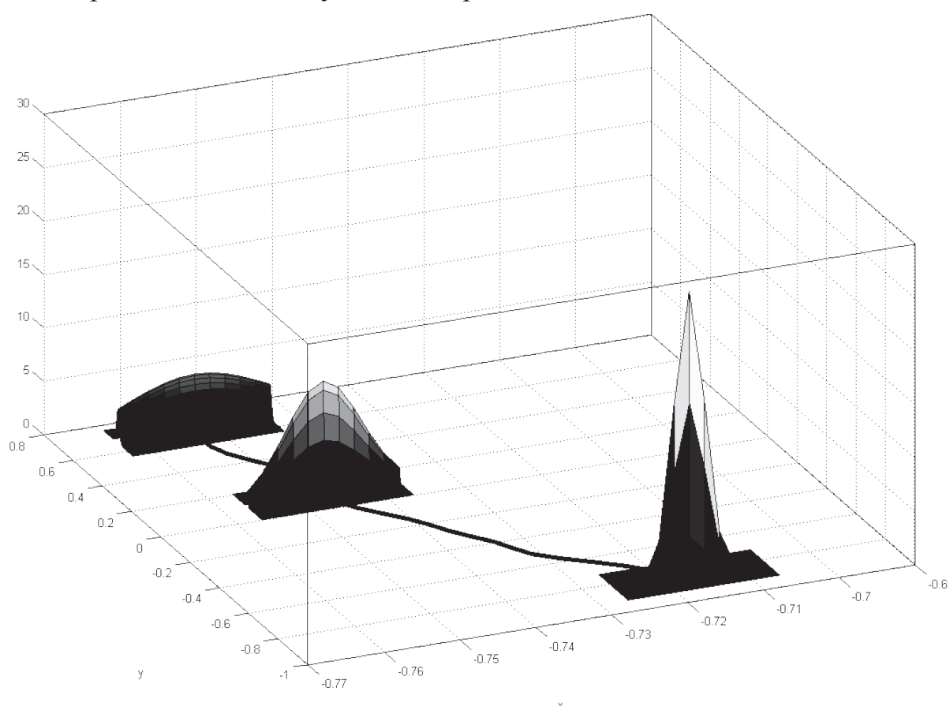


Рис. 2. Эволюция апостериорной плотности параметров положения (гауссовы аппроксимации)

Процедура обновления основана на результате работы Смита и Гельфанда [8]. В ней доказано, что формула Байеса в терминологии работ [6], [7] может трактоваться как взвешенный бутстрэп. Предположим, что набор $\{x_k^*(i)\}$ получен как случайная выборка из непрерывного распределения с плотностью $G(x)$, а требуется получить выборку из распределения с плотностью, пропорциональной $L(x) G(x)$, где $L(x)$ — известная неотрицательная функция. Теорема Смита–Гельфанда утверждает, что случайная выборка из дискретного распределения, сосредоточенного в точках $\{x_k^*(i)\}$ с вероятностными массами

$$q_i = \frac{L(x_k^*(i))}{\sum_{j=1}^N L(x_k^*(j))},$$

сходится по распределению при $N \rightarrow \infty$ к искомой плотности. В рассматриваемом случае $G(x)$ заменяется на $p(x_k | D_{k-1})$, а $L(x)$ — на $p(y_k | x_k) u_k(x_k)$.

Основное преимущество рассмотренного подхода состоит в том, что он не налагает никаких ограничений на вид функций f_k , h_k и u_k . Основные требования состоят в том, что:

- распределение $p(x_1)$ известно и допускает моделирование на основе техники Монте-Карло;
- распределение $p(y_k | x_k)$ известно;
- распределения $p(w_k)$ и $u_k(x_k)$ известны и допускают моделирование на основе техники Монте-Карло.

На выходе фильтра на каждом шаге появляется векторная выборка, которой можно распорядиться различными способами. Например, апостериорную вероятность попадания в некоторую зону можно оценить как долю выборочных значений, попавших в эту зону. Если имеются основания полагать, что апостериорное распределение унимодально, можно получить статистические характеристики каждой компоненты вектора состояний и любой функции от них.

Доказательства правомерности предлагаемого подхода основаны на асимптотических результатах, полученных в [8]. Исследовать свойства бутстрэпа для конечных выборок крайне сложно. Более того, как отмечается, например, в [2], [8], неясно соотношение между объемом выборок N и точностью получаемых результатов. На него влияют три фактора:

- размерность пространства состояний;
- степень соответствия априорного и апостериорного распределений;
- требуемое число шагов рекурсии.

Следует ожидать, что N быстро возрастает с ростом размерности задачи, причем эта скорость зависит от корреляций между компонентами. В то же время, при независимых компонентах эта скорость от размерности задачи не зависит.

Если область пространства состояний, в которой функция правдоподобия $p(y_k|x_k)$ принимает относительно большие значения, является достаточно узкой по сравнению с такой же областью для априорной плотности $p(x_k|D_{k-1})$, многим значениям $x_k^*(i)$ будут приписаны маленькие веса q_i . При этом наибольшее значение приобретут точки из первой области. В отсутствие шума системы все N векторов могут после нескольких шагов сконцентрироваться вблизи одной точки. Здесь возможна модификация базового алгоритма с увеличением числа точек, эмулируемых априорным распределением.

Выводы

Основным преимуществом базового подхода на основе техники Монте-Карло является практически полное отсутствие ограничений на вид функций в уравнениях динамики и измерений. Наиболее ограничительное требование состоит в том, чтобы эти уравнения допускали имитационное моделирование. Недостаток данного подхода состоит в экспоненциальном росте объема вычислений. Этот недостаток в значительной степени снимается при упрощающем предположении о равномерном и прямолинейном движении объекта слежения, так что проблема сводится к плохо обусловленной задаче нелинейной регрессии, рассмотренной в работах авторов [9] – [12]. При этом на каждом шаге строится распределение виртуальных сценариев поведения объекта, используемое в качестве априорного. На выходе фильтра появляется векторная выборка, которой можно распорядиться различными способами. Например, апостериорную вероятность попадания в некоторую зону можно оценить как долю выборочных значений, попавших в эту зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивакин Я. А. Методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем для диспетчеризации пространственных процессов / Я. А. Ивакин; под общ. ред. Р. М. Юсупова. — СПб.: СПИИРАН, 2008. — 248 с.
2. Doucet A. Sequential Monte-Carlo methods in practice / edited by A. Doucet, N. de Freitas, N. Gordon. — Springer New York, 2001. — 582 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-3437-9.
3. Gordon N. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation / N. Gordon, D. Salmond, A. Smith // IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing. — IET, 1993. — Vol. 140. — Is. 2. — Pp. 107–113. DOI: 10.1049/ip-f-2.1993.0015.
4. Carlin B. P. A Monte Carlo approach to nonnormal and nonlinear state—space modeling / B. P. Carlin, N. G. Polson, D. S. Stoffer // Journal of the American Statistical Association. — 1992. — Vol. 87. — Is. 418. — Pp. 493–500.
5. West M. Dynamic generalized linear models and Bayesian forecasting / M. West, P. J. Harrison, H. S. Migon // Journal of the American Statistical Association. — 1985. — Vol. 80. — Is. 389. — Pp. 73–83.

6. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа / Б. Эфрон. — М.: Финансы и статистика, 1988. — 263 с.
7. Alspach D. Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximation / D. Alspach, H. Sorenson // IEEE transactions on automatic control. — 1972. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. 439–448. DOI: 10.1109/TAC.1972.1100034.
8. Smith A. F. M. Bayesian statistics without tears: a sampling—resampling perspective / A. F. M. Smith, A. E. Gelfand // The American Statistician. — 1992. — Vol. 46. — Is. 2. — Pp. 84–88. DOI: 10.1080/00031305.1992.10475856.
9. Макшанов А. В. Слияние разноконтентной информации в задачах поиска подвижных морских объектов / А. В. Макшанов, Т. В. Попович // Информация и космос. — 2014. — № 4. — С. 70–72.
10. Макшанов А. В. Решение задачи оценивания параметров движения по данным угломерных измерений / А. В. Макшанов, Т. В. Попович // 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. 214–221.
11. Макшанов А. В. Оценивание параметров движения объекта при формировании сервисов интеллектуальных геоинформационных систем / А. В. Макшанов, В. И. Поленин, Т. В. Попович // Евразийский союз ученых. — 2015. — № 5–7 (14). — С. 71–75.
12. Леонтьев Ю. Б. Полисенарный подход в траекторном анализе источников гидроакустических сигналов / Ю. Б. Леонтьев, А. В. Макшанов, Т. В. Попович // Международный научный институт «Education». — 2016. — № 1 (19). — С. 32–37.

SOLUTION OF INFORMATION INTEGRATION PROBLEM FOR DISTRIBUTED MARITIME OBSERVATION SYSTEM (DMOS)

The paper regards processes of maneuvering target tracking at Distributed Maritime Observation System (DMOS), that requires integration of large volume of diverse information. The main purpose of DMOS is to support favorable navigation conditions, monitoring, save life on the sea for different ships in harbors, maritime roads and open sea. DMOS can be considered as a heterogeneous distributed computer system, it includes different layers of services at different levels of abstraction: ship, harbor, and regional and global levels. Such a framework is based on several satellite and maritime information systems that nowadays favor the integration of maritime data (e.g., AIS, ECDIS, OPTIMARE, GMDSS). Central problems at elaboration of such systems are integration of information of different kind received from different sources and taking into account inequality restrictions on region peculiarities. Despite big volume of input data there are situations when there are different gaps (time delays from minutes to hours) between target observations points. Well known algorithms of target tracking do not work properly in such situations. Analytics here is available only at narrow classes of evolution, measurement and outer information models. A joined artificial techniques scenario approach for tactical situation hypothesis development is proposed.

Data fusion approaches at estimating the parameters of moving object in the system of virtual scenarios of its behavior are regarded. New design of filters based on sample representations of posterior distribution is elaborated. The proposed approach describes synthesis of analytical and simulation methods for hypothesis statement when there are no variants to use suitable direct analytics. The result of filtering at each stage is the vector sample regarded as a sample from posterior distribution that may be treated variously. For example, probability of achieving any domain may be estimated as percentage of sample values at this domain, point estimate – as one of mean value statistics and so on.

Keywords: target tracking, data fusion, data gaps, distributed maritime observation systems, intelligent GIS (IGIS).

REFERENCES

1. Ivakin, Ja. A. *Metody intellektualizacii promyshlennyh geoinformacionnyh sistem dlja dispetcherizacii prostranstvennyh processov*. Edited by R. M. Jusupov. SPb.: SPIIRAN, 2008.
2. Doucet, Arnaud, Nando de Freitas, and Neil Gordon, eds. *Sequential Monte-Carlo methods in practice*. Springer New York, 2001. DOI: 10.1007/978-1-4757-3437-9.
3. Gordon, Neil J., David J. Salmond, and Adrian Smith. “Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation.” *IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing*. Vol. 140. No. 2. IET, 1993. DOI: 10.1049/ip-f-2.1993.0015.

4. Carlin, Bradley P., Nicholas G. Polson, and David S. Stoffer. "A Monte Carlo approach to nonnormal and nonlinear state-space modeling." *Journal of the American Statistical Association* 87.418 (1992): 493–500.
5. West, Mike, P. Jeff Harrison, and Helio S. Migon. "Dynamic generalized linear models and Bayesian forecasting." *Journal of the American Statistical Association* 80.389 (1985): 73–83.
6. Jefron, B. *Netradicionnye metody mnogomernogo statisticheskogo analiza*. M.: Finansy i statistika, 1988.
7. Alspach, Daniel, and Harold Sorenson. "Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximations." *IEEE transactions on automatic control* 17.4 (1972): 439–448. DOI: 10.1109/TAC.1972.1100034.
8. Smith, Adrian F. M., and Alan E. Gelfand. "Bayesian statistics without tears: a sampling–resampling perspective." *The American Statistician* 46.2 (1992): 84–88. DOI: 10.1080/00031305.1992.10475856.
9. Makshanov, A. V., and T. V. Popovich. "Slijanie raznokontentnoj informacii v zadachah poiska podvizhnyh morskikh obektov." *Informacija i kosmos* 4 (2014): 70–72.
10. Makshanov, A. V., and T. V. Popovich. "Solution of motion parameters estimation task by angular data." *Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatelskogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova: sb. nauch. st.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016: 214–221.
11. Makshanov, Andrey, Vladimir Polenin, and Tatyana Popovich. "Estimation of motion parameters of the object in the formation of intelligent services geoinformatic innovative systems." *Eurasian Union of Scientists* 5-7(14) (2015): 71–75.
12. Leontev, Yuri, Andrey Makshanov, and Tatiana Popovich. "Polyscenario approach at trajectory analysis of hydroacoustical signals." *Mezhdunarodnyj Nauchnyj Institut «Educatio»* 1(19) (2016): 32–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макшанов Андрей Владимирович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
andrey.makshanov@mail.ru
Ли Изольда Валерьевна —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
liiv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makshanov Andrey Vladimirovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
andrey.makshanov@mail.ru
Li Izolda Valerievna — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
liiv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-235-241
УДК 656.025.4/.6

А. А. Павлова,
С. С. Соколов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ

В статье рассматривается применение полиномиальных моделей для произведения расчетов характеристик хранения и переработки рефрижераторных контейнерных грузов. Система рассматривается на примере контейнерного терминала, имеющего условно-функциональные секции с определенным коэффициентом заполнения, на который поступает нерегулярный неоднородный поток судов с результирующей интенсивностью. Техническое оборудование порта, предназначенное для импорта и экспорта, не всегда может быть готово к хранению или обработке контейнерных грузов. В связи с этим необходима разработка моделей, которые позволяют оптимизировать и уменьшить затраты на оборудование и ресурсы. При проектировании сложных систем обслуживания контейнерных терминалов разумно использо-

вать систему совместимых и информационно-объединяемых полиномиальных моделей, которые определяются на основе методов активной идентификации. Актуальная теория определения сложных систем неразделимо связана с теориями оптимального управления и оптимального планирования эксперимента. Планирование вычислительного эксперимента осуществляется с помощью специализированных вычислительных моделей и обработки полученных результатов в соответствии с установленными критериями оптимальности, которые позволяют осуществить активную идентификацию процессов обработки и хранения рефрижераторных контейнерных грузов, т. е. получить совокупность совместимых моделей, которая благодаря учету используемых параметров исследуемых систем обслуживания демонстрирует полиномиальные зависимости различных показателей качества процессов. Под полиномиальными моделями процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов будем понимать полиномиальные зависимости: функции отклика от управляемых факторов. Управляемые факторы принимают значения нормированных параметров, равные 1,0 и –1. При расчетах будем использовать переход от ненормированных параметров (естественные обозначения) к нормированным параметрам и обратно.

Ключевые слова: планирование вычислительного эксперимента, полиномиальные модели, метод наименьших квадратов, рефрижераторный контейнерный терминал, хранение и обработка контейнерных грузов.

Введение

На сегодняшний день морские грузоперевозки остаются рентабельным способом перевозки грузов за счет низкой себестоимости, что позволяет морскому транспорту являться конкурентоспособным, несмотря на низкую скорость доставки. Морской порт является крупным транспортным узлом, использующим многие виды транспорта. Об эффективности функционирования разных видов транспорта в рамках морского порта свидетельствует положительная динамика роста грузооборота морских портов России. Согласно статистическим данным ассоциации морских портов России, грузооборот за десять месяцев 2016 г. увеличился на 5,7 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Такая же тенденция наблюдалась за периоды январь – декабрь 2014 г. и январь – декабрь 2015 г., увеличение грузооборота происходило на 5,7 % [1] – [2].

Сейчас большой популярностью пользуются контейнерные терминалы, для транспортировки грузов, требующих низкотемпературных условий, используются рефрижераторные контейнеры. Рефрижераторные контейнеры — это достижение современных технологий, они предназначены для перевозки грузов, требующих поддержания специального температурного и влажностного режима. В основном такие контейнеры используются для морских перевозок и хранения скоропортящихся грузов. Рефрижераторные контейнеры могут быть использованы при перевозках практически на всех видах транспорта, а также для хранения скоропортящихся грузов — как временного, при перевалке на грузовых терминалах, так и длительного. Применение рефконтейнеров позволяет доставлять груз «от двери до двери», не нарушая температурный режим хранения в пути следования и в процессе погрузки / выгрузки при смене видов транспорта.

Состояние проблемы

При проектировании сложных систем обслуживания контейнерных терминалов разумно использовать систему совместимых и информационно-объединяемых полиномиальных моделей, которые определяются на основе методов активной идентификации. Актуальная теория определения сложных систем неразделимо связана с теориями оптимального управления и оптимального планирования эксперимента. На данный момент имеется большое количество работ, посвященных оптимальной идентификации систем в различных классах моделей, при этом наблюдается переход от использования теории оптимального управления к применению теории оптимального планирования эксперимента [3] – [5].

Разработка комплекса полиномиальных и классических моделей систем обслуживания контейнерных терминалов требует применения специальных планов вычислительного эксперимента, которые учитывают специфические особенности систем и процессы их проектирования.

Планирование вычислительного эксперимента осуществляется с помощью специализированных вычислительных моделей и обработки полученных результатов в соответствии с установленными критериями и позволяет провести активную идентификацию процессов обработки и хранения рефрижераторных контейнерных грузов, т. е. получить совокупность совместимых моделей, которая, благодаря учету используемых параметров исследуемых систем обслуживания, демонстрирует полиномиальные зависимости различных показателей качества процессов.

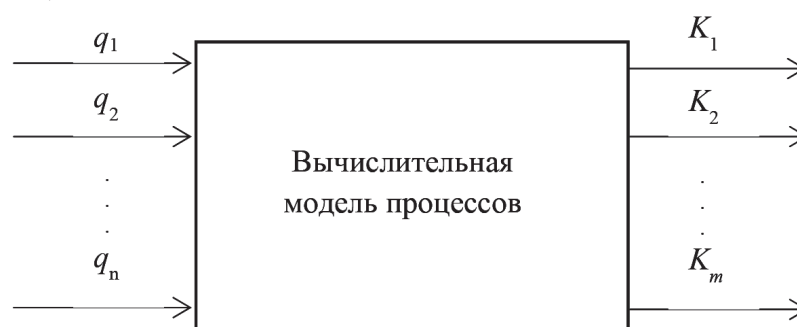
Для уменьшения затратной части и времени на этапе транспортировки грузов до территории порта широко используются контейнерные перевозки, они отличаются очень высокой степенью безопасности. Современные контейнеры разработаны и изготовлены с соблюдением всех существующих норм и стандартов, что гарантирует их прочность и герметичность. Это один из самых удобных и популярных видов транспортировки грузов. Во всем мире растет популярность использования контейнеров в качестве универсальной тары для перевозки грузов.

Техническое оборудование порта не всегда может быть готово к хранению или обработке контейнерных грузов. В связи с этим необходима разработка моделей, которые позволяют оптимизировать и уменьшить затраты на оборудование и ресурсы [2]. Рассмотрим полиномиальную модель, построенную на математической модели процессов хранения и обработки рефрижераторных контейнерных грузов, с помощью которой возможно уменьшить допущения при расчетах.

Методы решения

Используя методы планирования вычислительного эксперимента на основе функционального подхода, можно идентифицировать технические системы.

Функциональный подход при исследовании и оптимизации сложных систем можно представить в виде «черного ящика». Под «черным ящиком» понимается система, где можно исследовать входы и выходы, но внутреннее устройство неизвестно. Тогда функциональная модель представляет собой функциональные зависимости между характеристиками входов и выходов «черного ящика» (см. рисунок).



Функциональное представление технических систем

Под полиномиальными моделями процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов будем понимать полиномиальные зависимости — функции отклика $K_1, K_2, \dots, K_m$ от управляемых факторов $q_1, q_2, \dots, q_n$. Функция отклика (результат расчета) представляет собой вектор значений показателя качества, определенный на множестве состояний системы. Каждый фиксированный набор значений факторов определяет состояние системы и представляет условие проведения эксперимента (расчета).

Применение методов планирования эксперимента позволяет значительно уменьшить число наблюдений, но при этом увеличить точность полученных результатов за счет выбора соответствующего плана эксперимента. План эксперимента представляет собой определенное расположение точек в факторном пространстве. Факторным пространством является область определения параметров $\tilde{q}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), а границы области определяются диапазонами изменений данных параметров в соответствии с неравенствами $\tilde{q}_{i\min} \leq \tilde{q}_i \leq \tilde{q}_{i\max}$.

При выборе диапазонов изменений параметров следует учитывать, что увеличение диапазонов может привести к недостоверности полиномиальной модели. В теории планирования эксперимента обычно рассматривают факторное пространство — n -мерный параллелепипед или эллипсоид. Поэтому желательно осуществлять нормирование факторов, причем область определения параметров должна быть в пределах границ, установленных неравенствами $-1 \leq q_i \leq 1$. В этом случае n -мерный параллелепипед превратится в n -мерный куб. Основой симметричной типовой конфигурации является множество точек в факторном пространстве, определенных с помощью полного факторного эксперимента, на основе большого числа планов активного эксперимента. При описанном подходе нормирование параметров решает проблемы построения оптимальных планов эксперимента и упрощает процесс вычисления коэффициентов полиномиальной модели [6].

Нормирование параметров выполняется с помощью двух операций центрирования и масштабирования. Центрирование представляет собой перенос начала координат системы нормированных параметров в центр ненормированных параметров

$$\tilde{q}_{i0} = 0,5(\tilde{q}_{i\max} + \tilde{q}_{i\min}). \quad (1)$$

Масштабирование определяется нахождением полудиапазона изменения параметров

$$\Delta\tilde{q}_i = \tilde{q}_{i\max} - \tilde{q}_{i0}. \quad (2)$$

Соответственно выражение для i -го нормированного параметра будет выглядеть следующим образом:

$$q_i = \frac{\tilde{q}_i - \tilde{q}_{i0}}{\Delta\tilde{q}_i}. \quad (3)$$

Значения ненормированных параметров, соответствующих $q_{i\max}$, q_{i0} , $q_{i\min}$, равны 1,0 и $-1,0$.

В дальнейшем будем использовать для ненормированных параметров естественные обозначения, такие как F , m , и φ .

Постановка задачи

В настоящее время для адекватного представления показателей качества широкое распространение получил метод наименьших квадратов. Указанный метод позволяет выбрать коэффициенты полиномиальной модели таким образом, чтобы снизить сумму квадратов отклонений. Зависимость показателя качества представляется некоторой полиномиальной зависимостью $\hat{K}(q_1, q_2, \dots, q_n)$.

Полиномиальная модель представляет собой полином достаточно высокого порядка вида

$$K = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i q_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \leq j}}^n b_{ij} q_i q_j + \sum_{\substack{i,j,p=1 \\ i \leq j \leq p}}^n b_{ijp} q_i q_j q_p + \dots + \sum_{\substack{i_1, i_2, \dots, i_n \\ \sum i_j = d}}^n b_{i_1 i_2 \dots i_n} q_1^{i_1} q_2^{i_2} \dots q_n^{i_n}. \quad (4)$$

Метод наименьших квадратов является наиболее универсальной и эффективной процедурой поиска оценок неизвестных коэффициентов по экспериментальным данным. Другие методы аппроксимации не обеспечивают такие же широкие возможности.

Для поиска коэффициента полиномиальной модели используются следующая формула:

$$\bar{B} = (Q^T Q)^{-1} Q^T \bar{K}, \quad (5)$$

где Q — матрица наблюдений, получаемая из фиктивного параметра q_0 ; $\bar{K}$ — вектор значений функций отклика.

Рассмотрим полином четвертого порядка зависимости среднего времени ожидания $\bar{\tau}_{\text{ож}}$ от трех параметров: F — число условно функциональных секций; φ — коэффициент заполнения, на который поступает нерегулярный поток судов m (количество судов). Представим данный полином следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{\text{ож}} = & b_0 q_0 + b_1 q_1 + b_2 q_2 + b_3 q_3 + b_{11} q_1^2 + b_{12} q_1 q_2 + b_{13} q_1 q_3 + b_{22} q_2^2 + b_{23} q_2 q_3 + b_{33} q_3^2 + \\ & + b_{111} q_1^3 + b_{112} q_1^2 q_2 + b_{113} q_1^2 q_3 + b_{122} q_1 q_2^2 + b_{123} q_1 q_2 q_3 + b_{133} q_1 q_3^2 + b_{222} q_2^3 + b_{233} q_2 q_3^2 + \\ & + b_{333} q_3^3 + b_{1111} q_1^4 + b_{1112} q_1^3 q_2 + b_{1113} q_1^3 q_3 + b_{1122} q_1^2 q_2^2 + b_{1123} q_1^2 q_2 q_3 + b_{1133} q_1^2 q_3^2 + \\ & + b_{1222} q_1 q_2^3 + b_{1223} q_1 q_2^2 q_3 + b_{1233} q_1 q_2 q_3^2 + b_{1333} q_1 q_3^3 + b_{2222} q_2^4 + b_{2223} q_2^3 q_3 + b_{2233} q_2^2 q_3^2 + \\ & + b_{2333} q_2 q_3^3 + b_{3333} q_3^4, \end{aligned} \quad (6)$$

где q_1 — нормированное значение m ; q_2 — нормированное значение F ; q_3 — нормированное значение φ .

Используя, формулы (1) – (3) проведем переход к нормированным значениям от естественных обозначений (ненормированных). Проведем расчет показателя качества, принятого как среднее время ожидания $\bar{\tau}_{\text{ож}}$ для каждого эксперимента, описанного в плане. Для решения задачи по поиску коэффициентов полиномиальной модели воспользуемся методом наименьших квадратов. На основе данных расчетов определяется полиномиальная зависимость, которая в среднем наилучшим образом приближается к результатам расчетов.

Выводы

С развитием терминала претворялась в жизнь новая организационная структура управления, одновременно совершенствовались и методы, и аппарат оценки показателей работы перегрузочного терминала и других участков мультимодальных перевозок [7]. Для моделирования работы перегрузочного терминала используется теория планирования эксперимента. При этом системы массового обслуживания лежат в основе классического и полиномиального моделирования процессов переработки грузов [8]. Для определения характеристик процессов переработки контейнерных грузов не всегда целесообразно применять существующие модели массового обслуживания, так как указанные модели некорректно описывают процессы функционирования работы порта [9] – [10].

При построении математических моделей для описания пропускных способностей контейнерных терминалов имеет место много допущений при расчетах [11] – [12]. Таким образом, полученная полиномиальная зависимость позволяет произвести анализ процессов хранения контейнерных грузов в рефрижераторных терминалах, учитывая специфику процессов переработки грузов. При расчете полиномиальной модели мы можем найти среднее приведенное время ожидания. Результаты получаются точнее, чем при использовании вычислительного подхода.

Используя полиномиальные модели и схему функционального представления описанных технических систем, авторы произвели поиск коэффициентов полиномиальной модели, которые приближены к результатам расчетов вычислительной модели за счет выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. При осуществлении активного эксперимента произведен ряд наблюдений в определенных точках факторного пространства, используя матрицу планирования.

Выбор метода наименьших квадратов для вычисления коэффициентов полиномиальной модели позволяет решить все поставленные задачи, а именно: производить более точные расчеты за счет увеличения наблюдений (опытов). Планирование эксперимента направлено на произведение расчета на основе вычислительной модели вероятностных характеристик процессов хранения и переработки рефрижераторных контейнерных терминалов. Идентификация процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов на основе полиномиальных моделей четвертого порядка позволяет получать значения показателей качества с достаточной точностью за счет большого количества коэффициентов.

По результатам расчетов можно сказать, что среднее время ожидания, рассчитанное согласно представленной полиномиальной зависимости, дает более точную оценку по сравнению с результатами вычислительной модели, так как при алгебраическом представлении технической системы допускаются большее количество погрешностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ассоциация морских торговых портов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morport.com/rus/> (дата обращения: 01.11.2016).
2. Преимущества контейнерных перевозок. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.wiraj-perevozki.ru/text_7.html (дата обращения: 01.11.2016).
3. Русинов И. А. Формализация и оптимизация процессов переработки рефрижераторных грузов на специализированных терминалах / И. А. Русинов. — СПб.: Политехника, 2008. — 472 с.
4. Вычужанин В. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых сложных технических систем на основе моделирования и многокритериальной оптимизации / В. В. Вычужанин, Н. О. Шибасева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 223–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-223-231.
5. Кельманов А. В. Полностью полиномиальная аппроксимационная схема для одной задачи двухкластерного разбиения последовательности / А. В. Кельманов, С. А. Хамидуллин, В. И. Хандеев // Дискретный анализ и исследование операций. — 2016. — Т. 23. — № 2 (128). — С. 21–40. DOI: 10.17377/daio.2016.23.511.
6. Зубарев Ю. Я. Планирование эксперимента в научных исследованиях / Ю. Я. Зубарев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2004. — 154 с.
7. Зубарев Ю. Я. Вероятностная формализация процессов обработки контейнерных грузов с учетом ограничения на число судов в очереди / Ю. Я. Зубарев, Д. С. Ловяников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 109–113.
8. Максимов В. М. Вероятностные структуры и вероятностные множества / В. М. Максимов // Успехи математических наук. — 2007. — Т. 62. — № 6. — С. 181–182. DOI: 10.4213/rm7597.
9. Вихров Н. М. Стохастические модели управления технологическими процессами судоремонта / Н. М. Вихров, А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко // Морской вестник. — 2013. — № 2 (46). — С. 17–20.
10. Соколов С. С. Оптимизация грузопотоков при мультимодальном сообщении / С. С. Соколов, В. Н. Ежгуров // Научные труды SWorld. — 2013. — Т. 8. — № 1. — С. 68–73.
11. Семенов К. М. Планирование обработки грузов в морских портах и терминалах на основе дискретно-событийного имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / К. М. Семенов. — Калининград, 2014. — 171 с.
12. Бик Ю. И. Анализ опыта технического обслуживания портовых перегрузочных комплексов (на примере Сибирского региона) / Ю. И. Бик, Ю. И. Пивон // Речной транспорт (XXI век). — 2016. — № 2 (78). — С. 57.

USE POLYNOMIAL MODELS FOR MODELING PROCESSING OF REEFER CONTAINER CARGO

The article discusses the use of polynomial models for product calculations storage characteristics and processing of reefer container cargo. The system is seen as an example of a container terminal, having conditionally functional section with a certain duty cycle, which receives an irregular non-uniform flow vessels with the resultant intensity. Technical equipment in the direction of the port of import and export, can not always be prepared for storage or handling of containerized cargo. In this regard, the need to develop models that optimize and reduce the cost of equipment and resources. When designing sophisticated container terminal service systems is reasonable to use a set of agreed and compatible information polynomial models, which are determined based on the active identification methods. Current theory of complex systems identification is inextricably linked with the theory of optimal control theory and optimal experiment. Planning computational experiment based on specific computational models and processing of the results, in accordance with the criterion of optimality, it allows for the identification of active processing and storage of refrigerated containerized cargo, ie get a set of agreed models representing a polynomial depending on the different processes of the quality indicators of the studied systems of service parameters. We mean the polynomial depending Under polynomial models of processing of reefer container cargo: the response function of the controllable factors. Controllable factors assume the values of normalized parameters equal to 1.0 and -1. In the calculations we used the transition from non-normalized parameters (natural symbols) to the normalized parameters and back.

Keywords: planning computing experiment, polynomial models, least square method, refrigerated container terminal, storage and handling of containerized cargo.

REFERENCES

1. Associacija morskih trgovykh portov. Web. 1 Nov. 2016 < <http://www.morport.com/rus/> >.
2. Preimushhestva kontejnerykh perevozok. Web. 1 Nov. 2016 < http://www.wiraj-perevozki.ru/text_7.html >.
3. Rusinov, I. A. *Formalizacija i optimizacija processov pererabotki refrizheratornykh gruzov na specializirovannykh terminalah*. SPb.: Politehnika, 2008.
4. Vychuzhanin, Vladimir Viktorovich, and Natalia Olegovna Shibaeva. "Improving efficiency operation of ship complex technical systems based on modeling and multiobjective optimization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 223–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-223-231.
5. Kel'manov, A. V., S. A. Khamidullin, and V. I. Khandeev. "A fully polynomial-time approximation scheme for a sequence 2-cluster partitioning problem." *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 10.2 (2016): 209–219. DOI: 10.1134/S199047891602006X.
6. Zubarev, Ju. Ja. *Planirovanie jeksperimenta v nauchnykh issledovaniyah*. SPb.: SPGUVK, 2004.
7. Zubarev, Ju. Ja., and D. S. Lovjanikov. "Probabilistic formalization of containerized cargo handling process considering limitation of vessels in the queue." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 109–113.
8. Maksimov, V. M. "Probability structures and probability sets." *Russian Mathematical Surveys* 62.6 (2007): 1215–1217. DOI: 10.1070/RM2007v062n06ABEH004490.
9. Vikhrov, N. M., A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. "Stochastic models of technological procedures of ship-repair management." *Morskoy Vestnik* 2(46) (2013): 17–20.
10. Sokolov, S. S., and V. N. Ezhgurov. "Optimizacija gruzopotokov pri mul'timodal'nom soobshhenii." *Nauchnye trudy SWorld* 8.1 (2013): 68–73.
11. Semenov, K. M. *Planirovanie obrabotki gruzov v morskikh portah i terminalah na osnove diskretno-sobytiynogo imitacionnogo modelirovaniya*. PhD diss. Kaliningrad, 2014.
12. Bik, Ju. I., and Ju. I. Pivon. "The analysis of experience of maintenance service of port transshipment complexes (on the example of Siberian region)." *River transport (XXIst century)* 2(78) (2016): 57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлова Лидия Алексеевна — аспирант.
Научный руководитель:
Соколов Сергей Сергеевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
lidiya_pavlova13@mail.ru
Соколов Сергей Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
sokolovss@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavlova Lidiya Alekseevna — postgraduate.
Supervisor:
Sokolov Sergey Sergeevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
lidiya_pavlova13@mail.ru
Sokolov Sergey Sergeevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sokolovss@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2016 г.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРИРУЕМОЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕНИНГА И АТТЕСТАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНОГО ВУЗА

В работе рассматриваются основные проблемы синергии различных по архитектуре и функциональному назначению учебных и аналитических информационных систем учебного заведения в рамках единой информационной среды. Предложен новый подход на базе собственного программного интегратора, тренажера и системы аттестации знаний, а также методы анализа учебной информации в рамках единой информационной системы. Данная система базируется на глубокой взаимной интеграции базы знаний изучаемой предметной области, накопленной в результате функционирования различных систем автоматизированного управления технологическими процессами и методических знаний по управлению процессом подготовки инженеров водного транспорта. Целью и задачей исследований является разработка и адаптация средств формализации знаний инженеров водного транспорта; формализация знаний о процессах подготовки инженеров водного транспорта для сферы программной и системной инженерии, информационных систем и технологий; разработка базовой модели сети взаимодействия основных узлов и компонентов учебного процесса и его алгоритма управления. В работе использованы методы математического и сетевого моделирования, теории множеств, методы теории системного анализа сложных систем принятия решений. Рассмотрены вопросы повышения эффективности образовательного процесса за счет автоматизации оценки качества освоения практического и теоретического материала. Получены и проанализированы результаты работы автоматизированной системы подготовки специалистов водного транспорта в области информационных систем и технологий, а также в сфере инженерии. Продемонстрирована эффективность такой системы, выявлен потенциал по автоматизации документального процесса сопровождения деятельности учебного заведения.

Ключевые слова: информационная система; тренажер; дистанционное обучение; университет; интеграция; тренинг.

Введение

В настоящее время в системе высшего образования интенсивно исследуются методологии повышения эффективности и качества процесса подготовки специальных кадров, способные обеспечить для различных групп слушателей качественную адекватную поддержку их индивидуальной и коллективной подготовки. Требуется отметить, что комплексное обучение специалистов водного транспорта в сфере информационных технологий носит достаточно общий характер, и вопросы транспортной специализации с практической точки зрения рассматриваются крайне недостаточно.

Современные методы подготовки бакалавров, магистров и специалистов включают в себя, в том числе, и специализированные технологии виртуализации. С ростом потребности все разнообразнее становится рынок предлагаемых обучающих программно-аппаратных информационных комплексов, что, в конечном счете, приводит к высокой фрагментации и децентрализации его отдельных компонентов. Так, на базе комплексной информационной среды учебного заведения в действительности могут функционировать совершенно автономные узлы, которые, дублируя общие функции, зачастую имеют диаметрально противоположные подходы к их реализации. Эта ситуация ведет к уменьшению степени управляемости организации в целом и учебного процесса в частности, и, как следствие, к ухудшению качества образования и падению академического рейтинга. Также происходит десинхронизация результатов, ведущая к некорректной работе процедур мониторинга и управления учебной организацией, что влечет финансовые и материальные потери [1], [2].

Для решения изложенной проблемы на базе кафедры вычислительных систем и информатики ИВТ ГУМРФ было проведено исследование, целью которого стала выработка основных целей и принципов разработки и внедрения учебного тренажера, а также методов дефрагментации уже имеющихся систем, обслуживающих административно-хозяйственную деятельность кафедры, а также большинство ее дисциплин, таких как, например, «Информатика», «Вычислительная техника и сети», «Архитектура ЭВМ», «Системная инженерия», «Программная инженерия», «Корпоративные информационные системы», «Инженерная графика», «Сетевые протоколы и интерфейсы» и др. По результатам данного исследования установлено, что на рынке не существует открытых отечественных систем с функционалом, адекватным установленным требованиям в части подготовки специалистов в области информационных систем и технологий водного транспорта [3]. Таким образом, принято решение о разработке собственного программно-аппаратного интегрируемого тренажерно-аттестационного комплекса (ПАК).

Разработка и внедрение единого универсального интегратора как элемента ПАК

В качестве базы дефрагментатора выбран метод взаимной интеграции существующих компонентов информационной среды, таких как «IC: Экзаменатор», «E-Lab», «Colleteur», «АИСС ВУЗ» и др., с целью выработки синергического эффекта при сохранении имеющихся внутренних операционных процессов [4]. На основе результатов исследования и последующей разработки технического задания модуль интегратора будет включать в себя:

- централизованную базу данных (БД) для устранения информационно-логической избыточности путем создания и сопровождения единого хранилища для всех систем-участников процесса обучения;
- автоматический анализатор для приема и обработки полученных результатов в реальном времени по множеству необходимых срезов;
- единую систему мониторинга знаний для выработки индивидуальных рекомендаций слушателю курса на основе его работы во всех системах комплекса [5];
- окно удаленного доступа к БД для реализации свободного информационного обмена между внутренними и внешними субъектами системы;
- динамический интерфейс, способный «на лету» подхватывать новые и адаптировать существующие компоненты, органично сопрягая их с экосистемой учебной организации.

В качестве базы для эффективного интегрируемого ПАК выбрана платформа действующей системы дистанционного обучения на стыке платформ «IC: Экзаменатор» и «E-Lab», а также комплекс мер по актуализации прочих имеющихся подсистем, например ИС «Реплика» и АИСС «Парус». Признана необходимой разработка следующих компонентов инфраструктуры тренажера:

- общий обучающий модуль с расширенными возможностями виртуализации рассматриваемых процессов;
- модуль визуализации предоставляемых слушателям материалов, поддерживающий больше наиболее распространенных пользовательских систем, в том числе мобильных;
- общий аттестационный модуль, предназначенный для плановой проверки знаний слушателей [6], [7];
- специальный аттестационный модуль, предназначенный для «случайных» форсированных проверок в виде блиц-опросов и экспресс-тестирования;
- мультимедийный анализатор, предназначенный для проверки практических работ слушателей, например различных чертежей, таблиц, самостоятельных расчетов и т. п. [8];
- модуль, реализующий систему рангов и достижений как одного из основных и наиболее эффективных средств мотивации слушателей на достижение результата и его планомерное улучшение.

Рассматриваемый системный интегратор имеет двойственную сущность, так как одновременно является компонентом информационной системы учебной организации и вместе с тем осуществляет интерфейсные функции для прочих компонентов этой системы. Таким образом в рам-

ках оперируемой семантической модели операционной среды интегратор выступает и сущностью, и связью.

Внедрение централизованной базы данных позволяет интегратору оперировать единым, всегда максимально полным и актуальным информационным массивом, что ведет резкому росту эффективности аналитических и статистических компонентов экосистемы организации. Так, слушатели разных курсов и подразделений получают управляющие воздействия в рамках обобщенного опыта всей организации и, следовательно, избегают многих ошибок и негативных нюансов на основе стороннего опыта. С экономической точки зрения сосредоточенные базы данных менее ресурсоемки с точки зрения сопровождения и поддержки. Обслуживание таких БД можно проводить в оперативном формате без приостановки деятельности организации и без существенных накладных расходов.

Тип организации подразумевает возможность перехода его базы данных в класс сверхбольших, что накладывает дополнительные ограничения на средства обработки информации такой базы, на ее операционные и технические ресурсы и т. д. [9]. Однако использование такой базы данных, занимающей тера- и петабайты данных, немыслимо без соответствующей системы управления и операционной среды, что приводит к необходимости взаимной адаптации компонентов экосистемы организации, ее программной и аппаратной части, логической и физической структуры и даже модели данных.

Разработка и внедрение обучающей системы и тренажера

В соответствии с принятой парадигмой, базовый функционал учебного комплекса необходимо расширить в части теоретической и особенно практической подготовки слушателей [10]. Инициация учебного процесса происходит в рамках специализированных подсистем. Для обеспечения этого процесса, а также с целью углубления проверки практических навыков слушателей в учебно-аттестационный комплекс внедрены:

- подсистема «Документация»: механизм работы с чертежами, моделями, документами, таблицами и пр.;
- подсистема «Программирование»: механизм работы с алгоритмами и интерфейсами.

Все подсистемы в качестве базы используют микромодульную архитектуру, программные инфокоммуникационные интерфейсы на основе стандартного языка разметки (XML), имеют гибкие адаптационные механизмы, а также обладают достаточным уровнем производительности и масштабируемости. Принципиальная схема корневой управляющей автоматизированной информационно-справочной системы (АИСС) «ВУЗ» представлена на рис. 1.

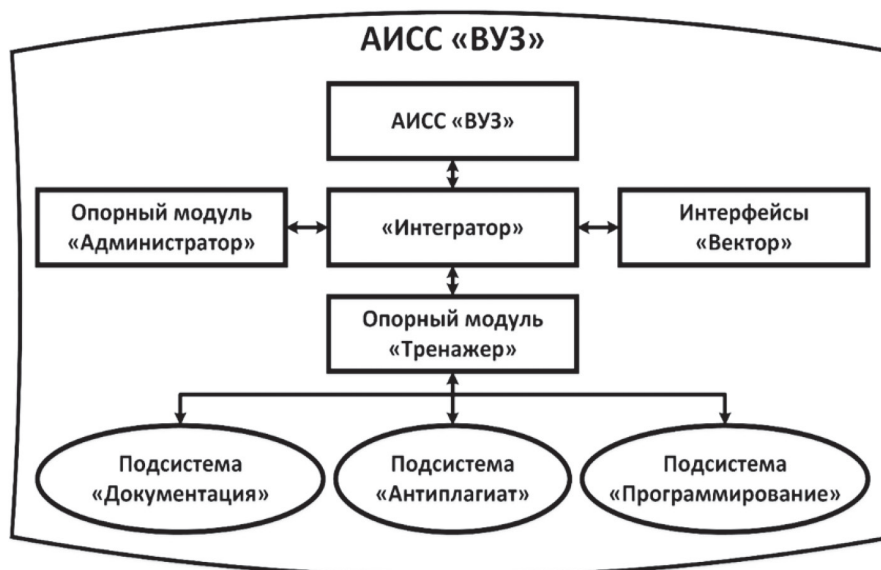


Рис. 1. Общая схема организации компонентов АИСС «ВУЗ»

Как видно из схемы, каждый из микрокомпонентов модуля можно условно отнести к одной из трех основных подсистем. Так, подсистема «Документация» как часть опорного модуля «Тренажер» предназначена для проверки объектов делопроизводства и документооборота. Для этого на входной интерфейс системы подаются информационные пакеты, состоящие преимущественно из фалов документальных форматов. Также присутствует возможность оперативного конвертирования данных для их нормализации. И подсистема, и ее конвертер имеют возможность динамической самомодификации с целью обеспечения поддержки рассматриваемых объектов как в ручном режиме, так и с помощью механизма самообучения.

Обеспечение делопроизводства крупной организации требует от подсистемы АИСС как развитых механизмов межкомпонентного взаимодействия, так и достаточно универсальных интерфейсов между ее различными функциональными блоками, в том числе и с опорной информационной системой «Тренажер» (рис. 2). Контейнерный тип подсистемы определяет не только ее функционал, но и основные операционные ресурсы, которыми с данным случае являются типовые и пользовательские алгоритмы обработки данных, элементы синтаксического анализатора, механизмы самообучения, средства поддержки масштабируемости и т. д. Перечисленные ресурсы служат основными адресуемыми единицами подсистемы и фактически, с точки зрения логической топологии информационной системы, являются ее фундаментом в виде модульного стека.

Принципиально такая подсистема может разрабатываться (и, соответственно, дорабатываться в дальнейшем) средствами практически любого высокоуровневого языка программирования. Однако в целях поддержания наследственности, а также по причине глубокого внедрения в учебный процесс был выбран язык C++, в том числе и как один из наиболее универсальных способов реализации поставленной задачи. Система обмена информацией организована при помощи «генетического» интерфейса, способного на каждой новой итерации адаптироваться под изменения в информационном пространстве. Межсистемное взаимодействие обеспечивается такими решениями как OLE (Object Linking and Embedding) — технология связывания и внедрения объектов в другие документы и объекты; COM (Component Object Model) — объектная модель компонентов; XDTO (XML Data Transfer Objects) — механизм ретрансляции.

Фактическое назначение подсистемы — это автоматизированная верификация выполненных слушателями лабораторных и практических заданий, связанных с работой в типовых прикладных программных комплексах документооборота и делопроизводства. Например, подсистема уже в базовой комплектации имеет все основные возможности по работе с объектами офисных сред (Microsoft Office, Open Office), систем документооборота, архивов и библиотек (1С), систем автоматизированного проектирования (САПР) и моделирования (Autodesk, Компас).

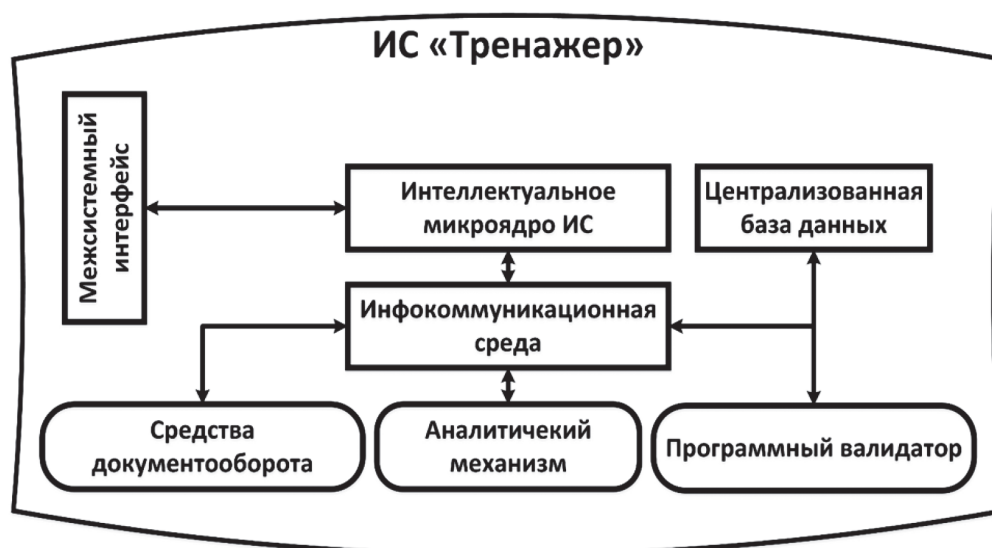


Рис. 2. Структура информационной подсистемы «Тренажер»

Подсистема «Программирование» реализована блоком компиляции, содержащим основные языковые решения для интерпретации пользовательских программ на соответствующих языках. Для каждого вхождения может быть разработан как типовый тестовый комплекс, так и его индивидуальный вариант в соответствии с заданными параметрами работы системы. Результатом работы подсистемы может являться бинарный ответ (верно – неверно), результат с оценкой общих сравнительных параметров (рейтинг), а также детализированный срез с разбором каждого этапа верификации (отчет). Целевой объект — интерфейс управляющей (вызвавшей) подсистемы или комплекс интерфейсов «Вектор».

Структурно подсистема представляет собой управляемую среду с центральным узлом — коммутатором. Управляющий узел определяет тип вхождения и передает его на один из адекватных исполняющих механизмов, представленных в виде квазикомпонентов ядра. Каждый такой элемент представляет собой иерархическую структуру однотипных компиляторов разных реализаций одного и того же языкового конструкта. Такой подход к решению задачи позволяет практически полностью избежать проблем обратной совместимости различных версий и поколений программных библиотек. Сама структура обладает коэффициентом масштабируемости, близким к единице, что позволяет ее модифицировать в сторону расширения практически без привлечения дополнительных ресурсов.

Графический интерфейс тренажера представляет собой визуализатор базовой платформы в виде толстого клиента или же динамическую разметку в виде управляемого (веб) клиента. На рис. 3 представлен вариант интерфейса толстого клиента с основным операционным меню, в процессе анализа подготовленного слушателем задания «Проектирование водозаборного гидроузла деривационной ГЭС на горной реке» в среде «Autodesk AutoCAD» в рамках дисциплины «Информационные технологии» направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по профилю «Гидротехническое строительство».

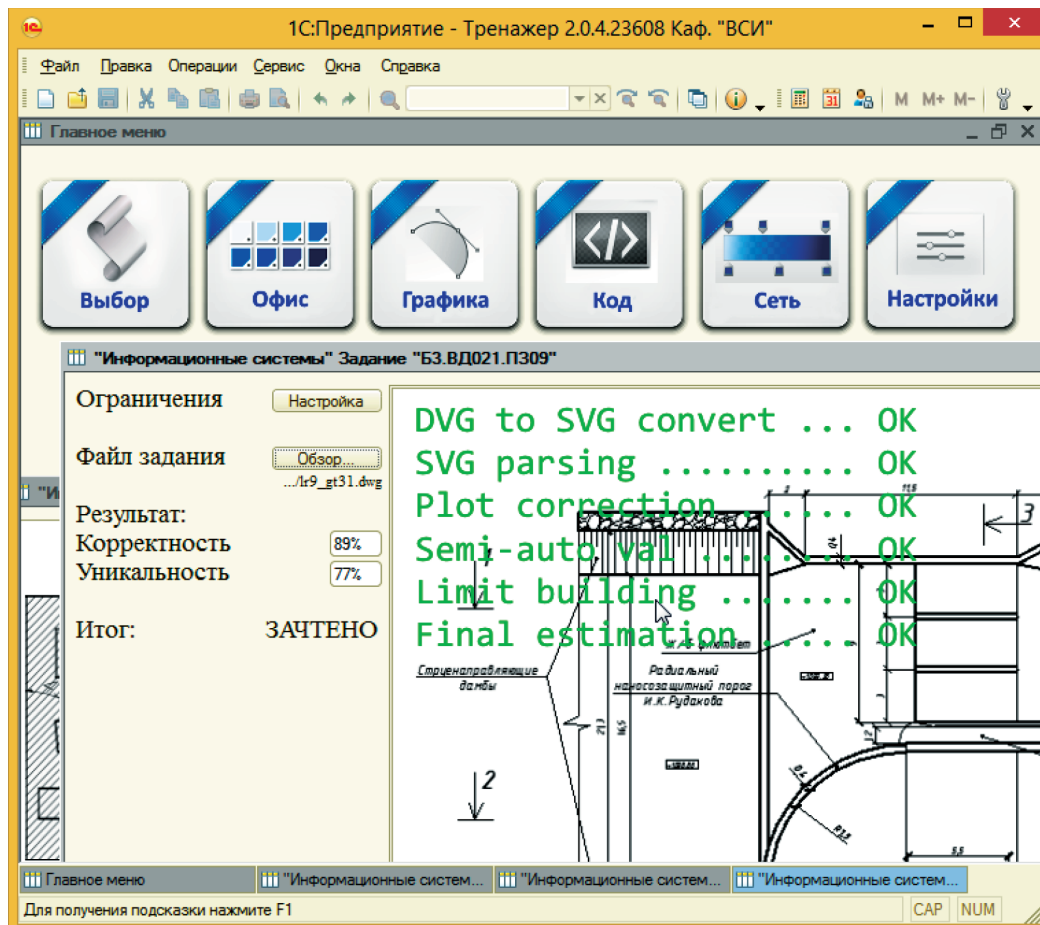


Рис. 3. Фрагменты анализатора в интерфейсе тренажера

Одним из наиболее востребованных механизмов подсистемы является специализированный анализатор, позволяющий дополнительно оценить выполненное практическое задание на:

- заимствование;
- эффективность;
- ресурсоемкость.

Также в большинстве случаев (зависящих от вида решаемой задачи) анализатор имеет возможность выставления сводной (рейтинговой) оценки предоставленному материалу [11]. Рейтинг отображает комплексный результат выполненной работы по одной из конфигурируемых шкал порядкового или интервального типа. В базовой комплектации система нацелена на перспективные средства в рамках актуальных ФГОС, а также на общую интеграцию в соответствии с положениями Болонского процесса.

Архитектура комплекса «Вектор» представляет собой гибридную метаструктуру на основе полносвязной модели взаимодействия. Основным операционным узлом является система переадресации, способная однозначно идентифицировать крайние узлы обмена, точно декодировать передаваемый пакет данных и при этом обеспечить необходимый уровень информационной безопасности. Процесс передачи данных между узлами информационного пространства организации в рамках рассматриваемой гетерогенной среды также имеет свои уникальные особенности.

Разработка и внедрение анализатора заимствований

Основным комплексным автоматизированным оценочным средством результата работы слушателя является подсистема «Антиплагиат». Она предназначена для общей оценки предоставленных документальных материалов с точки зрения их уникальности. Аналитические алгоритмы подсистемы функционируют на основании так называемых слепков, в простейшем случае — символьных, в самых сложных вариантах — объектных и бинарных. Каждый слепок представляет собой параметрический элемент специализированного справочника, относящегося к конкретной прикладной области, задаче, программному решению и т. д. Для снижения погрешности оценки используется кроссистемный анализ с привлечением мощностей прочих аналитических модулей, позволяющих это сделать. Для подсистемы разработаны два собственных слепочных метода:

- модельно-суффиксный метод на основании группы алгоритмов: осуществляет сопоставление входящего массива данных с имеющейся коллекцией;
- дактилоскопический метод: сравнивает небольшие фрагменты входящего массива с эталонными фрагментами коллекции, имеет управляемую глубину анализа.

В рамках процесса сопровождения подсистемы программного комплекса рассматривается возможность разработки и внедрения дополнительного, аксиологического метода, основанного на весовых коэффициентах отдельных слепков, зависящих от группы конфигурируемых факторов. Также средствами рассматриваемого интегратора возможно подключение внешних сервисов, осуществляющих схожую деятельность, что позволяет не только расширить саму базу эталонов, но и, используя стороннее API, задействовать альтернативные методы обнаружения заимствований. Возможен анализ материалов на (излишнее) самоцитирование.

Элементы системы как интегрированной среды разработки, осуществляющие проверку языковых конструкторов, также располагают возможностями механизма оценки критериальной эффективности. Основные критерии оценки:

- сложность;
- ресурсоемкость;
- быстроедействие.

Основным конфигурируемым элементом анализатора является блок ограничений. Он представляет собой комплекс условий, при достижении которых механизм анализатора генерирует новое событие в системе. Так, блок, в зависимости от типа и сложности задачи, может содержать критерии эксперимента, типизацию входного массива данных, условия работы типовых алгорит-

мов, комплекс внешних (пользовательских) сервисов, срез подсистемы системы мониторинга операционной среды и т. д.

Развитая система мониторинга системных процессов позволяет поддерживать актуальность базы данных в оперативном режиме. Так, например, действия и результаты слушателей одной группы конкретного курса напрямую могут влиять на задачи, вырабатываемые тренажерным комплексом для слушателей другой группы того же курса. Причем происходить это будет практически одновременно, т. е. параллельно, за счет тандема подсистем монитор-анализатор, где первый отвечает за оперативный сбор информации об успешности теоретической аттестации слушателей, а второй определяет наиболее сложные аспекты курса и вырабатывает указания практическому тренажеру на их закрепление для другой группы слушателей. Таким образом обучающая система «саморазвивается», совершенствуя комплексность и целостность практических навыков и теоретических знаний слушателей.

Эмпирические данные взаимодействия слушателей со всем тренажерным комплексом становятся фундаментом подсистемы анализа эффективности работы данного подразделения учебной организации [12]. Вместе с тем, опыт функционирования системы показывает стабильный рост эффективности учебных программ, и новые разработки в данной области будут призваны формализовать и стандартизировать данный опыт в рамках актуальных ФГОС, что позволит оценить эффективность уже с формальной точки зрения.

Рассматриваемый тандем, как и многие другие компоненты инфополя организации, напрямую связан с отчетными средствами АИСС. Например, подсистема веб-интерфейса позволяет отображать практически любую информацию в удобном виде на широчайшем спектре различных пользовательских устройств. Таким образом слушатели, представители целевых организаций и прочие заинтересованные субъекты образовательного процесса могут получать всегда актуальные сведения об успехах и достижениях своих подопечных, что, несомненно, является значительным стимулом в получении ими позитивного результата. Помимо учебного процесса, данная подсистема отображает информацию по множеству срезов и измерений, напрямую с учебным процессом не связанную. Например, она эффективно связывает расписание факультативных курсов, секций, кружков и т. д. с соответствующими предстоящими мероприятиями различных масштабов. Также средствами соответствующего механизма она способна индивидуально агрегировать установленные пользователем новости, события, публикации и т. д. и использовать их в персонализации контента в рамках допускающих это учебных курсов.

Выводы

В рамках процесса взаимной интеграции разнородных программно-аппаратных средств организации разработан универсальный интегратор как средство реализации поставленной задачи. По мере его внедрения в информационную среду, т. е. с увеличением числа взаимосвязанных узлов, растет общая эффективность управления столь большой и сложной организацией как государственный университет. Масштабируемость, близкая к единице, позволяет избавиться от большинства избыточных элементов системы при практически полном отсутствии дополнительных накладных расходов ресурсов организации. Метод организации единой информационной среды на основе действующих разнородных компонентов без отрыва от учебного процесса дает возможность наиболее полно реализовать потенциал отдельных элементов системы.

Разработанный в качестве компонента новой унифицированной среды «Тренажер» позволяет заменить большинство децентрализованных, сложно управляемых систем и методов оценки знаний слушателей на единое средство автоматизированной аттестации. Процесс аттестации становится прозрачным, из него практически полностью исключаются ошибки и конфликты, связанные с человеческим фактором, так как из процесса проверки знаний и навыков полностью или частично исчезает субъективность аттестующего, что обеспечивает скорость, точность и непредвзятость результатов. Доступные средства мониторинга позволяют контролировать процесс обучения и аттестации всем заинтересованным сторонам в реальном времени.

Потенциал и возможности, заложенные в систему информационной среды учебного заведения на основе новейших алгоритмов организации алгоритмической сети взаимодействия, позволяют ей самостоятельно и наиболее гибко адаптироваться к изменениям внешних факторов. Так, в качестве иллюстрации возможностей по анализу и самообучению, в рамках подсистемы документооборота реализован механизм динамических отчетов, предназначенный для автоматической эмиссии информационных структур по требованиям ФГОС.

На основе внедренных аналитических механизмов в рамках подсистемы антиплагиата функционируют новые методы поиска и идентификации заимствования и цитирования. В перспективе данные методы могут быть распространены на работу не только с документальной, но и с мультимедиа-информацией. Также на алгоритмическую базу перенесены идеи сематического анализа данных на основе соответствующей модели, позволяющие установить не только факт заимствования, но и оценить его смысловую нагрузку.

В целом формирование единой информационной среды с помощью предложенных систем, методов и механизмов позволяет значительно повысить возможности по управлению учебной организацией, преодолеть возможные барьеры в виде излишней бюрократизации делопроизводства, высвободить дополнительные ресурсы, упростить процесс мониторинга внутренней среды, а также оптимизировать общую стратегию управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышникова Н. Ю. Распределенная тестовая система оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // ИТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: мат. III науч.-исслед. конф. студентов и аспирантов факультета информационных технологий. 19 декабря 2014 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 18–20.
2. Тарануха С. Н. Дистанционные образовательные технологии в системе качества подготовки членов экипажей судов / С. Н. Тарануха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 216–222.
3. Крупенина Н. В. Организация распределенной системы подготовки и проведения электронного тестирования для оценки соответствия профессиональных компетенций работников морских специальностей / Н. В. Крупенина, Н. Ю. Барышникова, Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 216–228.
4. Бобырь Е. И. Комплексная модель адаптивной компьютеризированной системы обучения и тестирования на базе семантических сетей / Е. И. Бобырь, Л. Н. Радванская, В. В. Мартынов, Ю. В. Чепурная // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2009. — № 1 (34). — С. 491–496.
5. 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.
6. Журавлев А. Е. Об автоматизации системы контроля знаний в вузе в соответствии с положениями Болонского процесса / А. Е. Журавлев // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XIV межд. науч.-практ. конф. — М.: ООО «IC-Пабблишинг», 2014. — С. 77.
7. Журавлев А. Е. Автоматизация системы оценки качества освоения учебной программы / А. Е. Журавлев // Матер. XXV межд. конф. «Применение новых технологий в образовании», «ИТО-Троицк-2014». — М.: БАЙТИК, 2014. — С. 412–413.
8. Затхей В. А. Формально-логический аппарат представления знаний о процессах управления обучением в экспертных обучающих системах / В. А. Затхей, Н. В. Шаронова, И. Е. Лещенко // АСУ и приборы автоматики. — 2005. — № 130. — С. 52–56.
9. Чепурная Ю. В. Ситуационное управление в адаптивной компьютеризированной системе тестирования обучаемых / Ю. В. Чепурная // Экспертные оценки элементов учебного процесса: мат. XI межвуз. науч.-практ. конф. — Харьков: Народная украинская академия, 2009. — С. 65–66.
10. Широких Г. В. Моделирование процессов загруженности поступления информации на основе самообучающихся сетей / Г. В. Широких, С. Г. Черный // Информационные технологии моделирования и управления. — 2005. — № 2 (20). — С. 279–282.

11. Chernyi S. The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support / S. Chernyi // *Metallurgical and Mining Industry*. — 2015. — No. 3. — Pp. 60–65.

12. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // *Procedia Engineering*. — 2015. — Vol. 100. — Pp. 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490

INTEGRATED SOFT-HARDWARE TESTING SIMULATOR DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION ON THE TRANSPORT UNIVERSITY EXAMPLE

The paper discuss main aspects and problems of complex architecture synergy training and analytic information systems functional purpose of the institution within unified information environment framework based on custom software integrator, simulator, certifier and methods of educational information analysis. This system based on a deep mutual integration of studied subject area knowledge base, accumulated because of various technological processes automated control systems operation, and methodological knowledge for managing process of water transport engineers preparation. The research objective is development and adaptation of the water communications engineers knowledge formalization; knowledge formalization about processes of water communications engineers education for the software and system engineering sphere, information systems and technologies; basic interaction network model of the educational process main components and its control algorithm design and development. In the process used the mathematical and network modeling, set theory methods, system analysis of complex systems decision-making theory methods. The article discuss efficiency increase considered questions of educational process due to the mastering theoretical and practical material quality automation. Also in the work received execution process and results analysis of the water communications engineers in the information systems and technologies engineering sphere.

Keywords: information system, simulator, e-learning, university, integration; training.

REFERENCES

1. Baryshnikova, N. Ju, and L. N. Tyndykar. “Distributed test system for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties.” *IT: VCHERA, SEGODNJA, ZAVTRA: materialy III nauch.-issled. konferencii studentov i aspirantov fakul'teta informacionnyh tehnologij, 19 december 2014*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015: 18–20.
2. Taranuha, S. N. “Distance education technologies in the quality management system of training seafarers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 216–222.
3. Krupenina, N. V., N. Ju. Baryshnikova, and L. N. Tyndykar. “Organization of a distributed system by electronic testing for conformity assessment of professional competencies by employees of maritime specialties.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 216–228.
4. Bobyr, E. I., L. N. Radvanskaja, V. V. Martynov, and Ju. V. Chepurnaja (Ju. V. Martynova). “Kompleksnaja model adaptivnoj kompjuterizirovannoj sistemy obuchenija i testirovanija na baze semanticheskikh setej.” *Vestnik Hersonskogo nacionalnogo tehničeskogo universiteta* 1(34) (2009): 491–496.
5. Voronin, A. N. “Decomposition and composition of properties of alternatives in decision-making problems.” *Cybernetics and Systems Analysis* 1 (2009): 117–122.
6. Zhuravlev, A. E. “Ob avtomatizacii sistemy kontrolja znanij v vuze v sootvetstvii s položenijami Bolonskogo processa.” *Novye informacionnye tehnologii v obrazovanii: Sbornik nauchnyh trudov četyrnadcatoj mezhd. nauch.-prakt. konf.* M.: OOO «IS-Publishing», 2014: 77.
7. Zhuravlev, A. E. “Avtomatizacija sistemy ocenki kachestva osvoenija uchebnoj programmy.” *Materialy XXV mezhd. konf. «Primenenie novyh tehnologij v obrazovanii», «ITO-Troick-2014»*. M.: BAJTIK, 2014: 412–413.
8. Zathej, V. A., N. V. Sharonova, and I. E. Leshhenko. “Formalno-logičeskij apparat predstavlenija znanij o processah upravljenija obucheniem v jekspertnyh obuchajushhih sistemah.” *ASU i pribory avtomatiki* 130 (2005): 52–56.

9. Chepurnaja, Ju. V. "Situacionnoe upravlenie v adaptivnoj kompjuiterizirovannoj sisteme testirovanija obuchaemyh." *Jekspertnye ocenki jelementov uchebnogo processa: materialy XI mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* Harkov: Narodnaja ukrainskaja akademija, 2009: 65–66.

10. Shirokih, G. V., and Chernyj, S. G. "Modelirovanie processov zagruzhennosti postuplenija informacii na osnove samoobuchajushhihsja setej." *Informacionnye tehnologii modelirovanija i upravlenija* 2(20) (2005): 279–282.

11. Chernyi, S. "The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support." *Metallurgical and Mining Industry* 3 (2015): 60–65.

12. Zhilenkov, A., and S. Chernyi. "Investigation performance of marine equipment with specialized information technology." *Procedia Engineering* 100 (2015): 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавлев Антон Евгеньевич —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
zhuravlevae@gumrf.ru
Васильченко Дмитрий Сергеевич —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
tillaus@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhuravlev Anton Evgenevich — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
zhuravlevae@gumrf.ru
Vasilchenko Dmitriy Sergeevich — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
tillaus@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 октября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-251-259

УДК 371.3:681.51

Д. А. Печников

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И ПРОЦЕДУР ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ ТЕСТИРОВАНИЯ ВМФ

В данной статье рассматривается разработка моделей и процедур интервальной оценки результатов контроля знаний в компьютерных системах с применением методов, основанных на законах биномиального распределения и геометрического распределения как частного случая отрицательного биномиального распределения. Предложен новый переход от точечных оценок эмпирической частоты успешного выполнения тестовых заданий к интервальным оценкам вероятности этой успешности, позволяющим определять погрешность и доверительный интервал полученных оценок. Также разработаны модели критериально-ориентированного оценивания в компьютерных системах тестирования, доказано, что данные модели повышают результаты текущего педагогического контроля. Для того чтобы осуществлять военно-профессиональную подготовку специалистов ВМФ, необходима соответствующая учебно-материальная база. Основу такой базы раньше всегда составляли действующие учебные и тренировочные образцы военной техники и вооружения, которые ранее поступали в военно-морские учебные заведения в достаточном количестве и обеспечивали необходимый уровень как теоретической, так и практической подготовки будущих офицеров ВМФ. В результате резкого сокращения в 1990 гг. отраслей военно-промышленного комплекса, разрабатывающих технику и вооружения для ВМФ, новейшие образцы этой техники и вооружений теперь изготавливаются не сериями, а отдельными экземплярами. Вопрос о производстве учебных и тренировочных образцов не стоит вообще. В этих условиях в качестве единственного средства, способного обеспечить военно-профессиональную подготовку, могут рассматриваться только виртуальные аналоги образцов военной техники и вооружения, разрабатываемые средствами информационных технологий, т. е. тренажерно-обучающие системы ВМФ. Разработка и применение предлагаемых в данной статье моделей интервального оценивания результатов критериально-ориентированного те-

стирования обеспечивает переход от точечных оценок эмпирической частоты к оценкам вероятности правильного действия, которые имеют количественно оцениваемый доверительный интервал. Последнее обеспечивает применение этих моделей для решения задачи автоматизации управления процессом критериально-ориентированного тестирования в целях обеспечения его оперативности путем остановки процедуры предъявления технического задания после получения оценки заданной достоверности.

Ключевые слова: доверительный интервал, интервальная оценка, компьютерная система тестирования, критериально-ориентированное тестирование, биномиальный закон распределения.

Вводная часть

В тенденциях развития тренажерно-обучающих систем (ТОС) ВМФ отмечается следующий ряд основных противоречий: 1) между ростом возможностей ТОС как средств моделирования управляемых объектов и неизменностью их дидактических характеристик; 2) между необходимостью индивидуализации процесса подготовки и ограниченными психофизиологическими возможностями обучающихся по управлению обучением в группах с количественным составом более пяти–семи обучаемых; 3) между ростом числа и сложности задач управления обучением и неизменностью психофизиологических возможностей руководителей обучения.

В качестве средства разрешения этих противоречий рассматривается автоматизация в ТОС ВМФ функций управления обучением. Ключевой функцией, без автоматизации которой нельзя автоматизировать все остальные функции управления обучением, является функция педагогического контроля качества подготовки обучаемых. Качество реализации в ТОС ВМФ функции контроля качества подготовки различно в отношении знаний и действий (умений и навыков) обучаемых. На достижение целей контроля усвоения знаний в ТОС ВМФ ориентирована компьютерная система тестирования военного назначения (КСТ ВН) «Система автоматизированного контроля (САК)», которая входит в состав комплекса программ инструментальных средств (КПИС) «Медиа-тор». Эта КСТ является типичным представителем современных КСТ и полностью соответствует современному уровню их развития.

ГОСТ РВ 51540-2005 и ГОСТ РВ 15.205-2004 определяют КСТ по функциональному назначению как продукцию двойного назначения и относят КСТ к комплектующим изделиям межотраслевого применения (КИМП), представляющим собой «изделие военной техники (ВТ), предназначенное для выполнения определенных технических функций в составе изделий ВТ или их составных частей, создаваемое не для конкретного изделия ВТ по самостоятельным комплектам и не подвергаемое изменениям в процессе создания изделий ВТ, в котором его применяют». В соответствии с классификациями, приведенными в ГОСТ РВ 51540-2005 и ГОСТ Р 50-605-80-93, КСТ должны быть отнесены к изделиям ВТ, которые входят в категорию учебно-тренировочных средств, принадлежащих к учебной ВТ как виду ВТ.

В настоящее время в компьютерных системах тестирования наибольшее распространение получили тестовые задания закрытого типа с единственным верным ответом, которые применяются не менее чем в 92 % случаев. В рассматриваемых тестовых заданиях успешность их выполнения оценивается путем установления факта совпадения ответа обучаемого с заранее заданным правильным вариантом ответа, любой другой вариант является неправильным. Для последующей статистической обработки результаты (верно – неверно) выполнения таких тестовых заданий представляются в виде дихотомической переменной (0 – 1).

Существует большое число компьютерных систем тестирования. По оценкам авторов, только в свободном доступе в Интернете их представлено не менее 50. Абсолютное большинство КСТ (VeralTest, iSpring QuizMaker, MyTest, AVELife TestGold Studio, UniTest System, Универсальный тестовый комплекс и т. д.) ориентировано на решение задач текущего педагогического контроля, который должен осуществляться в процессе обучения и обеспечивать адаптивность управления этим процессом. Текущий контроль, как показано в [2], [4], [7] – [9] и др., может быть реализован только методами критериально-ориентированного тестирования, идентифицирующими соотно-

шения «усвоил – не усвоил» между конкретными обучаемыми и конкретными познавательными объектами, в отношении которых реализуется рассматриваемый процесс обучения. При этом «сам тест должен полностью соответствовать содержанию обучения и разрабатываться тем преподавателем, который осуществлял обучение» [4].

В таких тестах преобладает форма закрытого технического задания (ТЗ) с единственным правильным ответом. Так, из 3581 ТЗ, ориентированных на решение задач текущего педагогического контроля и представленных в Интернете, эта форма используется в 3304 случаях, т. е. в 92,3 %. По данным других авторов [1], [4], [6], [10], доля заданий с единственным правильным ответом колеблется от 86 % до 98 %. Эти оценки и определяют целесообразность первоочередного решения задач интервального оценивания в отношении ТЗ закрытого типа с единственным верным ответом. Безошибочность (правильность) ответов обучаемого определяется в виде показателя частности B , который имеет вид

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n j_i}{n}, \quad (1)$$

где i ($i = \overline{1, n}$) — номер ТЗ; n — число ТЗ в тесте; $(j_i = \overline{0, 1})$ — результат выполнения ТЗ ($j_i = 1$ — верный ответ; $j_i = 0$ — неверный ответ).

Все существующие процедуры обработки результатов выполнения тестов в КСТ основаны на оценке вида (1). Такие оценки являются точечными и не несут информации о величине своей погрешности, а потому не могут быть использованы в целях обеспечения оперативности процедуры тестирования (прекращения тестирования при получении оценки, имеющей заданную погрешность). Далее предлагаются модели и процедуры интервального оценивания результатов выполнения систем ТЗ закрытого типа с единственным верным ответом, которые, в отличие от точечных оценок, несут в себе информацию как о своей наиболее вероятной величине, так и о ее погрешности.

Постановка и решение задачи интервальной оценки результатов критериально-ориентированного тестирования

Предлагаемые модели и процедуры базируются на том факте, что показатель «правильность» является дихотомической переменной, а процедура его определения в процессе решения обучаемым тестирующей выборки из n заданий соответствует схеме Бернулли.

Для корректного применения схемы Бернулли должны быть выполнены следующие условия:

1) каждое испытание имеет ровно два исхода, условно называемых успехом и неудачей;
2) независимость испытаний: результат очередного эксперимента не должен зависеть от результатов предыдущих экспериментов;

3) вероятность успеха должна быть постоянной (фиксированной) для всех испытаний.

Первое условие всегда выполняется за счет того, что в ТЗ закрытого типа с единственным верным ответом результаты представлены дихотомической переменной ($j_i = \overline{0, 1}$).

Второе условие в критериально-ориентированном тестировании выполняется также всегда за счет возможности предъявления всех ТЗ в случайном порядке.

Третье условие выполняется только в случае, когда обучаемый никаких новых сведений об объектах тестирования из формулировки ТЗ не получает. Выполнение этого требования ограничено существованием у обучаемого возможности угадывания верного решения. Возможность угадывания правильного решения имеет место во всех формах ТЗ закрытого типа, но в форме задания с единственным верным ответом вероятность такого угадывания наиболее высока.

Для исключения этой возможности и достижения истинности результатов тестирования в тестологии используются два метода. Суть первого метода состоит в снижении вероятности угадывания путем увеличения в ТЗ числа дистракторов (альтернатив решений). В тестологии [1], [5], [6], [10] и др. считается, что истинность оценки выполнения систем закрытых ТЗ с единственным верным ответом достигается, если во всех ТЗ число дистракторов равно или больше

пяти. Суть второго метода состоит во введении поправки на угадывание в результат (1) тестирования. В случае критериально-ориентированного тестирования используются фиксированные поправки, виды которых приведены в [1], [5], [6], [10] и др. Оба метода реализуемы в любой из КСТ.

С учетом изложенного примем допущение о том, что вероятность правильного выполнения ТЗ определяется только знаниями обучаемого и не зависит от фактора угадывания. В соответствии с этим допущением безошибочность выполнения ТЗ обучаемым характеризуется некоторой постоянной вероятностью $p = \text{const}$ правильного выполнения ТЗ, что и определяет полное соответствие процедуры критериально-ориентированного тестирования схеме Бернулли.

Пусть в результате решения обучаемым выборки из n ТЗ получен вектор (примеры векторов приведены в табл. 1)

$$\vec{j} = (j_1, \dots, j_i, \dots, j_n), \quad (2)$$

в котором $j_i = \overline{0,1}$ есть оценки успешности выполнения соответствующего задания ($j_i = 1$ — ТЗ выполнено без ошибок, $j_i = 0$ — ТЗ выполнено с ошибкой). Требуется оценить вероятность p безошибочного решения ТЗ.

Таблица 1

Некоторые варианты векторов результатов тестирования для $n = 12$

Вариант	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}	j_{11}	j_{12}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
7	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
8	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
9	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
10	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0

Эмпирические данные, полученные по схеме Бернулли, подчиняются законам таких распределений как биномиальное, геометрическое и отрицательное биномиальное. В целях интервальной оценки вероятности p безошибочного выполнения ТЗ целесообразно использовать те законы распределения, которые обеспечивают обработку любого числа ($i, i = \overline{1, +\infty}$) ТЗ. Такому требованию соответствуют только законы биномиального и геометрического распределения. Биномиальное распределение имеет место в тех случаях, когда последовательность испытаний Бернулли обрывается после проведения фиксированного числа n испытаний. При этом под биномиальной случайной величиной X понимается число успехов в серии из n испытаний Бернулли.

Вероятность $P(J)$ появления вектора J при биномиальном распределении оценивается как

$$P(J) = C_n^k p^{n-k} q^k \quad \text{при} \quad C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (3)$$

где J — рассматриваемый вектор результатов тестирования; p — вероятность безошибочного выполнения ТЗ; $q = 1 - p$ — вероятность выполнения задания с ошибкой; k — число заданий, выполненных с ошибкой; n — общее число заданий; $n - k$ — число заданий, выполненных без ошибок.

Геометрическое распределение возникает при обрыве испытаний сразу же после первого успеха или неудачи. При этом вероятность $P(J; j_i = 1)$ успеха оценивается как

$$P(J; j_i = 1) = p^h q, \quad (4)$$

а вероятность $P(J; j_i = 0)$ неудачи — как

$$P(J; j_i = 0) = q^h p, \quad (5)$$

где p — вероятность безошибочного выполнения задания; $q = 1 - p$ — вероятность выполнения задания с ошибкой; $h(h = \overline{1, n})$ — номер i последнего ТЗ, выполненного без ошибки или, наоборот, с ошибкой (число «неудач» до первого «успеха» или число «успехов» до первой «неудачи»).

Для обеспечения возможности использования геометрического распределения в отношении векторов (2) любой конфигурации введем понятие вектора $\vec{h}$ непрерывного результата (успеха или неудачи), под которым будем понимать любую часть вектора (2), каждый из элементов которой равен 1 или 0. Если все элементы вектора равны 1 ($j_i = 1$) — вектор $\vec{h}^+$ непрерывного успеха, если все элементы вектора равны 0 ($j_i = 0$) — вектор $\vec{h}^-$ непрерывной неудачи. Например, в табл. 1 для шестого варианта вектора $\vec{j}$ — это вектора $\vec{h}_1^+ = (j_1, j_2)$, $\vec{h}_2^- = (j_3, j_4, j_5, j_6, j_7, j_8, j_9)$, $\vec{h}_3^+ = (j_{10}, j_{11}, j_{12})$.

Вероятность появления вектора (1) можно оценивать с двух позиций [11] – [13]:

1) как вероятность события L , заключающегося в том, что при выполнении n заданий обучаемым было достигнуто $(n - k)$ успехов (допущено k ошибок);

2) как вероятность события H , заключающегося в появлении в векторе (1) m векторов непрерывного результата.

Вероятность $P(L)$ наступления события L оценивается по биномиальному закону. В соответствии с (3), при определении доверительного интервала (ДИ) вероятности p успешного выполнения ТЗ корректно использование следующих формул:

1) оценка точного ДИ биномиального распределения [3]:

$$\left(\frac{(n - k)}{(n - k) + (k + 1)F_{2(k+1), 2(n-k), 1-\varepsilon/2}}, \frac{(n - k + 1)F_{2(n-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}}{k + (n - k + 1)F_{2(n-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}} \right), \quad (6)$$

где n — число испытаний; k — число ошибок; $F_{f, g, \alpha}$ — квантиль порядка α распределения F с f, g степенями свободы;

2) оценка приближенного ДИ биномиального распределения [3]:

$$\left(p^* - u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{n}}, p^* + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{n}} \right) = \left(\frac{n-k}{n} - u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{(n-k)k}{n^2}}, \frac{n-k}{n} + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{(n-k)k}{n^2}} \right), \quad (7)$$

где p^* — оценка эмпирической частоты правильного выполнения ТЗ; $u_{1-\varepsilon/2}$ — квантили стандартного нормального распределения порядка $1 - \varepsilon / 2$.

Геометрическое распределение является единственным дискретным распределением со свойством отсутствия памяти (последствия): знание об отсутствии успеха (неудачи) в предыдущих опытах никак не влияет на распределение оставшегося числа опытов до появления успеха (неудачи). Используем это свойство для оценки вероятности события H , которое заключается в появлении в векторе (2) m векторов непрерывного результата.

В соответствии с ним события $h_s \in H$ появления в составе вектора (2) отдельных векторов $\vec{h}_s$ непрерывного результата относятся к категории попарно несовместных событий. Поэтому вероятность $P(H)$ любого из вариантов их реализаций (см. табл. 1) оценивается по формуле

$$P(H) = P(h_1 \cup \dots \cup h_s \cup \dots \cup h_m) = P(h_1) + \dots P(h_s) + \dots P(h_m), \quad (8)$$

где $s (s = \overline{1, m}; m \leq n)$ — номер вектора непрерывного результата; n — число выполненных ТЗ; $P(h_s)$ — вероятность появления отдельных векторов $\vec{h}_s$ непрерывного результата, оцениваемая в соответствии с (4), (5).

Для оценки в (8) неизвестного параметра p предлагается использовать метод правдоподобия, при котором в качестве оценки вероятности p принимается ее значение

$$\hat{p} = \arg \max_{p \in (0,1)} f(\vec{j}|p) = \arg \max_{p \in (0,1)} P(H), \quad (9)$$

максимизирующее вероятность $P(H)$ появления при выполнении n ТЗ вектора $\vec{J} = (j_1, \dots, j_i, \dots, j_n)$, включающего m ($m = \overline{1, n}$) векторов $\vec{h}_s$ непрерывного результата.

Соответствующая функция $W(p_s, p)$ правдоподобия для любой из реализаций события $H = \cup h_s$ может быть представлена в виде

$$W(p_s, p) = \prod_{s=1}^{s=m} P(h_s) = \prod_{s=1}^{s=l} P(h_s^+) \prod_{s=l+1}^{s=m} P(h_s^-) = p^{(n-k)+(m-l)} q^{k+l}, \quad (10)$$

где k ($k = \overline{0, n}$) — число ТЗ, выполненных с ошибкой; $(n-k)$ ($(n-k) = \overline{0, n}$) — число ТЗ, выполненных правильно; s ($s = \overline{1, m}$) — номера векторов $\vec{h}_s$ непрерывного результата s ($s = \overline{1, l}$); ($s = \overline{l+1, m}$) — соответственно номера векторов непрерывного успеха и непрерывной неудачи; l , ($m-l$) — соответственно число векторов непрерывного успеха и непрерывной неудачи ($m+l \leq n$).

Поиск оценки $\hat{p}$ наибольшего правдоподобия целесообразно реализовать путем решения следующей задачи нелинейного программирования:

$$\left. \begin{aligned} p^{(n-k)+(m-l)} (1-p)^{k+l} &\rightarrow \max_p; \\ p &\in (0, 1). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для решения (11) можно использовать стандартную функцию «Solve (Поиск решения)» Microsoft Excel. ДИ оценки $\hat{p}$ может быть определен как

$$\left(\hat{p} - u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}, \hat{p} + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \right). \quad (12)$$

Сравним оценки обучаемых, полученные обычным путем на основе предлагаемых моделей.

Пусть обучаемыми выполнено 13 заданий и получены результаты, приведенные в табл. 1. Оценки этих результатов тестирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки результатов тестирования, приведенных в табл. 1

Номер варианта	$n-k$	k	l	$m-l$	Точечная оценка по (1)	Интервальные оценки					
						биномиального распределения			геометрического распределения		
						вероятнейшее значение по (3)	границы ДИ по (6)		вероятнейшее значение по (11)	границы ДИ по (12)	
							нижняя	верхняя		нижняя	верхняя
1	12	0	1	0	1,000	1,000	0,735	1,000	0,923	0,754	1,000
2	6	6	1	1	0,500	0,500	0,211	0,789	0,500	0,182	0,818
3	6	6	1	1	0,500	0,500	0,211	0,789	0,500	0,182	0,818
4	6	6	6	6	0,500	0,500	0,211	0,789	0,500	0,182	0,818
5	6	6	6	6	0,500	0,500	0,211	0,789	0,500	0,182	0,818
6	5	7	2	1	0,417	0,417	0,152	0,723	0,400	0,089	0,711
7	9	3	3	2	0,750	0,750	0,428	0,945	0,647	0,343	0,951
8	10	2	4	2	0,833	0,833	0,516	0,979	0,667	0,367	0,966
9	8	4	2	2	0,667	0,667	0,349	0,901	0,625	0,317	0,933
10	7	5	4	4	0,583	0,583	0,277	0,848	0,550	0,234	0,866

Выводы

На современном уровне развития информационных технологий тестирование является единственным универсальным техническим средством текущего контроля знаний обучаемых [14] – [17]. Процедуры контроля знаний в современных компьютерных системах тестирования не соответствуют предъявляемым к ним требованиям по следующим характеристикам:

- 1) отсутствию возможности оценки погрешности результатов тестирования;
- 2) отсутствию возможности прекращения тестирования при достижении заданной достоверности его результатов

Оценки, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что применение предлагаемых моделей интервального оценивания результатов критериально-ориентированного тестирования обеспечивает переход от точечных оценок эмпирической частоты к оценкам вероятности правильного действия, которые имеют количественно оцениваемый ДИ. Последнее обеспечивает применение этих моделей для решения задачи автоматизации управления процессом критериально-ориентированного тестирования в целях обеспечения его оперативности путем остановки процедуры предъявления ТЗ после получения оценки заданной достоверности. Разработанный в статье новый переход от точечных оценок эмпирической частоты успешного выполнения тестовых заданий к интервальным оценкам вероятности этой успешности, позволяет с достаточной точностью определять погрешность и доверительный интервал полученных оценок.

Для эффективного внедрения средств оперативного критериально-ориентированного педагогического контроля знаний в процесс подготовки специалистов ВМФ и обеспечения возможности совместного анализа и обработки оценок результатов обучения, целесообразно реализовать следующие практические рекомендации:

- формулировку системы предпочтений преподавателя в отношении качества подготовки обучаемых и системы предпочтений преподавателя в отношении значимости единичных тестовых заданий в тесте следует рассматривать в качестве наиболее ответственных этапов подготовки теста к практическому использованию;
- преподавателю, впервые производящему ввод своих систем предпочтений, следует проверить их фактическое соответствие на выборке из пяти – десяти таких результатов выполнения теста, которые покрывают весь спектр возможных результатов (от полностью верных до полностью неверных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аванесова Т. П.* Электронное обучение: учеб. пособие / Т. П. Аванесова, А. Н. Печников, А. Н. Шиков. — СПб.: Изд-во Военной академии связи, 2014. — 73 с.
2. *Евсигнеев А. Е.* Концепция развития тестовой технологии контроля уровня обученности студентов в системе профессионального образования России. [Электронный ресурс] / А. Е. Евсигнеев. — Режим доступа: http://www.vevivi.ru/best/downloads.html&req=download&code=confirm_download&id=156184 (дата обращения: 07.11.2016).
3. *Наумов В. Н.* Теоретические основы представления содержания профессиональной подготовки специалистов ВМФ в интеллектуальных обучающих системах: дис. ... д-ра воен. наук / В. Н. Наумов. — СПб.: ВВМИРЭ им. А. С. Попова, 1994. — 296 с.
4. *Переверзев В. Ю.* Технология разработки тестовых заданий: справ. рук. / В. Ю. Переверзев. — М.: Е-Медиа, 2005. — 265 с.
5. *Печников А. Н.* О соответствии результатов критериально ориентированного тестирования целям текущего педагогического контроля / А. Н. Печников, Д. А. Печников // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире.* — 2015. — № 10-5. — С. 74–85.
6. *Аванесов В. С.* Композиция тестовых заданий: учебная книга для преподавателей вузов, учителей школ, аспирантов и студентов педвузов / В. С. Аванесов. — 4-е изд. — М.: Центр тестирования, 2002. — 237 с.
7. *Ким В. С.* Тестирование учебных достижений: монография / В. С. Ким. — Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2007. — 214 с.
8. *Печников А. Н.* Решение задач текущего педагогического контроля на основе анализа результатов критериально-ориентированного тестирования / А. Н. Печников, Д. А. Печников // *Образовательные технологии и общество.* — 2015. — Т. 18. — № 2. — С. 489–513.
9. *Иванов В. Н.* Метод автоматизированной оценки качества профессиональной деятельности в корабельных автоматизированных системах: дис. ... канд. воен. наук / В. Н. Иванов. — СПб.: ВМИРЭ, 2009. — 187 с.

10. Печников А. Н. Проектирование и применение компьютерных технологий обучения. / А. Н. Печников, Ю. А. Ветров. — СПб.: Изд-во БГТУ, 2002. — Ч. 1. Концепция систем автоматизированного обучения и моделирование процессов деятельности. Кн. 1. — 195 с.
11. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика / Б. Л. Ван дер Варден: пер. с нем. — М.: Иностранная литература, 1960. — 436 с.
12. Печников А. Н. Комплекс методов и моделей оценки качества и эффективности деятельности операторов вооружения и военной техники в тренажерно-обучающих системах ВМФ: дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Печников. — СПб.: СПбГЭТУ, 2011. — 343 с.
13. Печников А. Н. Генератор оценки / А. Н. Печников, А. М. Стручков, Е. В. Хекерт, [и др.]. — Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2009613362 от 26.06.2009.
14. Платов А. Н. Автоматизация управления контролем подготовки на тренажерах ВМФ: дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Платов. — СПб.: 1 ЦНИИ МО РФ, 2000. — 125 с.
15. Пузырев В. Ю. Диагностика деятельности операторов корабельных электромеханических систем в специализированных тренажерах ВМФ: дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Пузырев. — Новороссийск: НГМА, 2005. — 129 с.
16. Чельщикова М. Б. Адаптивное тестирование в образовании (теория, методология, технология) / М. Б. Чельщикова. — М.: Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2001. — 165 с.
17. Чельщикова М. Б. Теория и практика конструирования педагогических тестов: учеб. пособие / М. Б. Чельщикова. — М.: Логос, 2002. — 432 с.

DEVELOPMENT OF MODELS AND PROCEDURES FOR INTERVAL ESTIMATION OF THE RESULTS OF CONTROL OF KNOWLEDGE IN COMPUTER SYSTEMS TESTING, NAVY

This article discusses the development of models and procedures for interval estimation of knowledge of test results in the computer systems using methods based on the laws of the binomial distribution and geometric distribution, as a special case of the negative binomial distribution. A new transition from the point estimates of the empirical relative frequency successful execution of tests for interval estimates ve probability of success, allowing determination of the error and the confidence interval of the estimates. Also in the article are designed criterion-based model otse-nivaniya computer testing systems, proven data model that increases the results of the re-curent pedagogical control. To carry out military training experts of the Navy requires appropriate training facilities. The basis of such a framework had always constituted existing training and tre-nirovochnye samples of military equipment and weapons that had previously acted in naval schools in sufficient numbers and to ensure the necessary level of both theoretical and practical training of future naval officers. As a result of the sharp contraction in 1990, branches of the military-industrial complex, developing a techno-ku and weapons for the Navy, the newest samples of the equipment and weapons are now manufactured Xia not series and individual pieces. The issue of education and training samples production is not worth at all. In these circumstances, as the only means capable of providing military training, can be considered only the virtual counterparts of military equipment and weapons, developed by means of information and technologies, ie, trenazherno-learning systems (TOS) of the Navy. Development and application of the proposed model in this paper interval estimation criterion-oriented test results provide a transition from an empirical point estimates often-sti to the estimated probability of correct actions, which have quantified CI. The latter provides for the use of these models to solve the problem of automation of process control criterion-based testing to ensure its efficiency by stopping the procedure after receiving the submission of TK assessment given credibility.

Keywords: interval estimation, confidence intervals, binomial distribution.

REFERENCES

1. Avanesova, T. P., A. N. Pechnikov, and A. N. Shikov. *Jelektronnoe obuchenie: uchebnoe posobie*. SPb.: VAS, 2014.
2. Evsigneev, A. E. *Koncepcija razvitija testovoj tehnologii kontrolja urovnja obuchennosti studentov v sisteme professionalnogo obrazovanija Rossii*. Web. 7 Nov. 2016 <http://www.vevivi.ru/best/downloads.html&req=download&code=confirm_download&id=156184>.

3. Naumov, V. N. Teoreticheskie osnovy predstavlenija soderzhanija professionalnoj podgotovki specialistov VMF v intellektualnyh obuchajushhijh sistemah. Dr. diss. Petrodvorec: VVMIRJe im. A. S. Popova, 1994.
4. Pereverzev, V. Ju. *Tehnologija razrabotki testovyh zadanij: spravocnoe rukovodstvo*. M.: E-Media, 2005.
5. Pechnikov, A. N., and D. A. Pechnikov. "Relevant findings criterion-oriented testing purpose of this pedagogical control." *Fundamentalnye i prikladnye issledovanija v sovremenom mire* 10-5 (2015): 74–85.
6. Avanesov, V. S. *Kompozicija testovyh zadanij. Uchebnaja kniga dlja prepodavatelej vuzov, uchitelej shkol, aspirantov i studentov pedvuzov*. 4-th ed. M.: Centr testirovanija, 2002.
7. Kim, V. S. *Testirovanie uchebnyh dostizhenij: Monografija*. Ussurijsk: Izdatelstvo UGPI, 2007.
8. Pechnikov, A. N., and D. A. Pechnikov. "Reshenie zadach tekushhego pedagogicheskogo kontrolja na osnove analiza rezultatov kriterialno-orientirovannogo testirovanija." *Obrazovatelnye tehnologii i obshhestvo* 18.2 (2015): 489–513.
9. Ivanov, V. N. Metod avtomatizirovannoj ocenki kachestva professionalnoj dejatel'nosti v korabel'nyh avtomatizirovannyh sistemah. PhD diss. Petrodvorec: VMIRJe, 2009.
10. Pechnikov, A. N., and Ju. A. Vetrov. *Proektirovanie i primenenie kompjuternyh tehnologij obuchenija. Ch.1. Konceptcija sistem avtomatizirovannogo obuchenija i modelirovanie processov dejatel'nosti. Kn.1*. SPb: BGTU, 2002.
11. Van der Varden, B. L. *Matematicheskaja statistika*. Translated. M.: Izd-vo Inostrannoj literatury, 1960.
12. Pechnikov, A. N. Kompleks metodov i modelej ocenki kachestva i jeffektivnosti deja-telnosti operatorov vooruzhenija i voennoj tehniki v trenazherno-obuchajushhijh sistemah VMF. Dr. diss. (Tech.). SPb.: SPbGJeTU, 2011.
13. Pechnikov, A. N., A. M. Struchkov, E. V. Hekert, et al. Generator ocenki: The computer program. Certificate № 2009613362. Publ. 26.06.2009.
14. Platon, A. N. Avtomatizacija upravljenja kontrolem podgotovki na trenazherah VMF. Phd diss. SPb.: I CNII MO RF, 2000.
15. Puzyrev, V. Ju. Diagnostika dejatel'nosti operatorov korabelnyh jelektromehanicheskijh sistem v specializirovannyh trenazherah VMF. PhD diss. Novorossijsk: NGMA, 2005.
16. Chelyshkova, M. B. *Adaptivnoe testirovanie v obrazovanii (teorija, metodologija, teh-nologija)*. M.: Issledovatel'skij centr problem kachestva podgotovki specialistov, 2001.
17. Chelyshkova, M. B. *Teorija i praktika konstruirovanija pedagogicheskijh testov: Uchebnoe posobie*. M.: Logos, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Печников Денис Андреевич —
кандидат технических наук, доцент.
Военно-морская академия имени Адмирала Флота
Советского Союза Н. Г. Кузнецова
19pda72@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pechnikov Denis Andreevich —
PhD, associate professor.
Naval Academy named after Admiral
of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsova
19pda72@bk.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Выпуск 6 (40)

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 28.12.16. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 32,5. Тираж 500 экз. Заказ № 663/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7