

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

ВЕСТНИК

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

Том 11. № 3

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — Т. 11. — № 3. — 194 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

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

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



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 417

- Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Левченко В. П.* Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций 417
- Дерябин В. В.* Оценка погрешности метода счисления долготы судна 430
- Бураковский Е. П., Бураковский П. Е.* Изучение структуры коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях 439
- Ивакин Я. А., Потапычев С. Н., Ивакин Р. Я.* Рациональный алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта на базе геохронологического трекинга 448
- Онищенко И. С., Рычко В. А.* Уточнение дополнительных эксплуатационных ограничений Российского Речного Регистра для пассажирских судов класса «М-СП4,5» 461
- Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Шульга О. В.* Влияние технического состояния элементов перегрузочного оборудования на экологическую безопасность и пропускную способность угольного терминала 474
- Валькова С. С., Васильев Ю. И.* Методика оценки склада морского порта методами имитационного моделирования 485
- Сигаев Д. Б., Шатыло А. П.* Способы повышения уровня подготовки судоводителей на разных этапах их профессионального развития 499
- Иванова А. А., Шахнов С. Ф., Буцанец А.А.* Оценка влияния промышленных помех при построении системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС / GPS 509

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 519

- Барышников С. О., Карклина Т. О., Чистов В. Б.* Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями 519
- Черныш А. А., Яковлев С. Н.* Экспериментальное исследование деформативности полиуретановых эластомеров, применяемых в судовых амортизаторах 534
- Алсаид М., Саламех А., Мамонтов В. А.* Исследование судостроительного полимерного композиционного материала на прочность 543
- Лебедева М. П., Вишневикий Л. И.* Силы на гребном винте маневрирующего судна 554

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 565

- Матвеев В. Т., Очеретяный В. А., Дологлонян А. В.* Энергоэффективность воздухонезависимых микрогазотурбинных установок сложных циклов для подводной техники 565

Том 11. № 3

2019

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.
rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.
NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма

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

Г. В. Егоров

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

Ф. В. Кармазинов

координатор стратегических программ 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., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	573
<i>Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М.</i> Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения.....	573
<i>Ахрестин М. А., Воршевский А. А., Воршевский П. А.</i> Определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета.....	582
<i>Соколова О. В., Соколов И. С.</i> Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей.....	592

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	417
<i>Kuznetsov A. L., Semenov A. D., Levchenko V. P.</i> The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity	417
<i>Deryabin V. V.</i> The assessment of the vessel's longitude dead reckoning technique error	430
<i>Burakovskiy E. P., Burakovskiy P. E.</i> Study of the structure of coefficient taking account the human factor under the navigation accidents.....	439
<i>Ivakin Y. A., Potapychev S. N., Ivakin R. Y.</i> Optimal algorithm of hypotheses testing at the ship use research based on the geochronological tracking	448
<i>Onishchenko I. S., Rychko V. A.</i> Revision of the additional operational restrictions of the Russian River Register for the passenger vessels of "M-SP4.5" class.....	461
<i>Zub I. V., Ezhov Yu. E., Schulga O. V.</i> The influence of the technical condition of the handling equipment elements on environmental safety and capacity of the coal terminal	474
<i>Valkova S. S., Vasil'ev Yu. I.</i> A methodology for assessing the seaport warehouses using the imitation modeling methods	485
<i>Sigaev D. B., Shatylo A. P.</i> Methods of the navigator's competence level improvement on the different stages of his professional development.....	499
<i>Ivanova A. A., Shakhnov S. F., Butsanets A. A.</i> Assessment of the man-made interference impact at the construction of control and management system of the river local differential subsystem GLONASS / GPS.....	509
 SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	 519
<i>Baryshnikov S. O., Karklina T. O., Chistov V. B.</i> Reliability of ships hulls with overall residual deformations.....	519
<i>Chernysh A. A., Yakovlev S. N.</i> An experimental study of the deformation of polyurethane elastomers applied in the ship's shock-absorbers.....	534
<i>Alsaid M., Salamekh A., Mamontov V. A.</i> A study of shipbuilding polymer composite material for strength	543
<i>Lebedeva M. P., Vishnevskii L. I.</i> Forces on the manoeuvring ship propeller	554
 SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	 565
<i>Matviienko V. T., Ocheretianyi V. A., Dologlonyan A. V.</i> Energy efficiency of air-independent micro-gas-turbine plant of complex cycles for the underwater equipment	565

Volume 11. № 3

2019

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief

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

S. Gutsma

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

G. V. Yegorov

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

F. V. Karmazinov

Strategic Program Coordinator of SUE "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

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

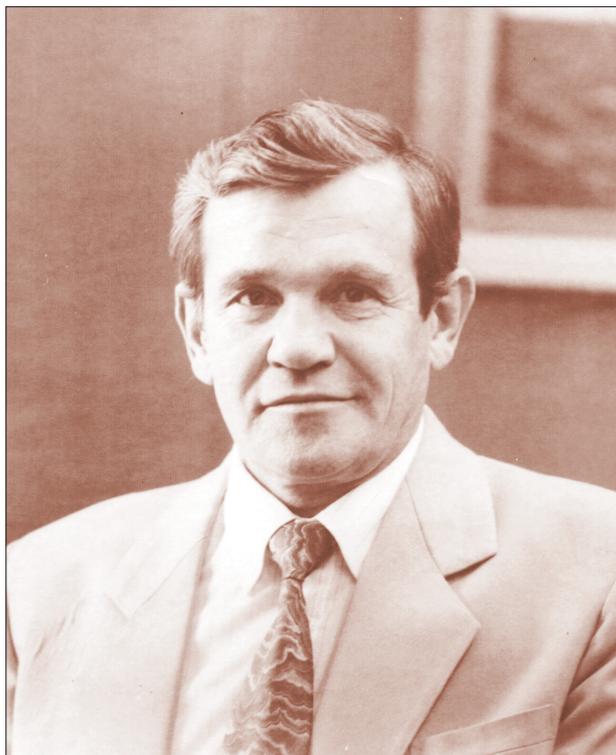
**Editorial
Collegium:**

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatın,
doctor of technical Sciences
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
S. Ye. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
A. L. Tezиков,
doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....573

Romanovsky V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Switched reluctance drive
SRD-1000-1100 in the electromotive systems.....573
Akhrestin M. A., Vorshevsky A. A., Vorshevsky P. A. Determination
of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation
and calculation accuracy estimation582
Sokolova O. V., Sokolov I. S. A device for diagnostics of turn-to-turn faults
and bearings defects of induction electric motors.....592

К 80-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА А. С. БУТОВА



В. А. Бабури́н,
канд. техн. наук, проф.,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

И. Д. Шилкина,
канд. экон. наук, проф.,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

КОГДА ОСТАЕТСЯ ПАМЯТЬ...

Первое сентября — очень важный день, а для нас он еще и символичен — 1 сентября 2019 г. исполняется 80 лет со дня рождения Анатолия Сергеевича Бутова — первого ректора нашего вуза. И чем больше проходит времени с тех пор, как его нет с нами, тем отчетливее его коллеги, соратники, ученики — все, кому посчастливилось работать и общаться с Анатолием Сергеевичем, понимают масштаб и глубину его личности.

Анатолий Сергеевич Бутов (1939–2004) — доктор технических наук, профессор, действительный член Международной академии наук, технологии и инжиниринга, действительный член Международной академии наук высшей школы, президент Российской академии транспорта, Почетный работник речного флота, Заслуженный работник высшей школы — российский ученый и педагог.

«Наше знакомство состоялось 55 лет тому назад, в 1964 г., — вспоминает канд. техн. наук, проф. В. А. Бабури́н, — я — счастливый первокурсник инженерно-экономического факультета, Толя Бутов — уверенный и спокойный студент выпускного курса. Жили мы в студенческом общежитии на пл. Стачек в соседних (через одну) комнатах с видом на стадион Кировского завода. Сблизились в пространстве спорта, футбола, в частности, оба были болельщиками московского «Спартака» и часто вместе смотрели трансляции футбольных матчей по телевидению в фойе на третьем этаже с последующим обсуждением результатов и прогнозов. Сложившиеся в студенческие годы отношения сохранились на всю жизнь. Мы вместе работали на кафедре организации перевозок, почти одновременно начинали педагогическую деятельность: он читал лекции,

а мы с Т. Е. Енгальчевской на его курсе вели практические занятия и многому у него научились, прежде всего — отношению к делу. Позже работали в ректорате — Анатолий Сергеевич ректором (1992–2004), я — проректором (1992–2007). Сложные были времена, но ценными являются воспоминания о результатах и опыте, полученном в процессе совместной работы».

Профессиональную судьбу А. С. Бутова определило распределение — в 1965 г., после окончания Ленинградского института водного транспорта (ЛИВТа), он был направлен на кафедру организации перевозок, которую возглавлял в то время доцент А. П. Ирхин. В 60-е гг. XX в. А. П. Ирхин был одним из первых, кто активно разрабатывал и внедрял в практику эксплуатационной работы водного транспорта и, естественно, в учебный процесс, теорию управления, математические методы и вычислительную технику. Молодой инженер-исследователь Анатолий Бутов под руководством А. П. Ирхина с энтузиазмом включился в работу, занимался математическим и имитационным моделированием на ЭВМ транспортного процесса и составляющих его элементов и параллельно, по рекомендации своего научного руководителя, изучал прикладную математику в Ленинградском государственном университете. Результатом работы явилась блестящая защита в 1973 г. кандидатской диссертации на тему: «Экономико-математическое моделирование и оптимизация режимов работы линейного судоходства».

В 1974 г. началась преподавательская деятельность А. С. Бутова. Он принимал активное участие в создании в 70-е гг. под руководством д-ра техн. наук, проф. А. П. Ирхина электромеханической модели имитации работы флота и портов — инновационной для того времени учебной лаборатории для изучения студентами методов управления транспортным процессом. Впоследствии она была модернизирована на современной ИТ-базе в лабораторию моделирования транспортного процесса им. проф. А. С. Бутова и сейчас напоминает сотрудникам и студентам о вкладе ученого в развитие отрасли и родного университета.

Научные исследования А. С. Бутова были связаны с совершенствованием методов моделирования и оптимизации работы флота и внедрением ИТ на предприятиях речного транспорта. В течение трех лет он руководил поисковыми исследованиями в рамках творческого содружества с пароходством «Волготанкер», а с 1980 г. — комплексными исследованиями по совершенствованию управления транзитными перевозками; в течение шести лет являлся генеральным конструктором АСУ «Порт» Министерства речного флота РСФСР. В эти годы Анатолий Сергеевич являлся постоянным участником всесоюзных научно-практических конференций по вопросам применения вычислительной техники и математических методов на водном транспорте.

Результаты научных исследований А. С. Бутова нашли практическое применение и были внедрены в разработанных под его руководством и при непосредственном участии: АСУ «Порт» в г. Ленинграде, г. Осетрово и г. Горьком (ныне — Нижний Новгород); АСУ «Пароходство» в ОАО «Волготанкер», где используется до сих пор, и частично в Беломорско-Онежском пароходстве, Северо-Западном речном и Волго-Донском речном пароходствах; АСУ заграничными перевозками Министерства речного флота РСФСР. Эти исследования и разработки легли в основу его докторской диссертации на тему: «Методические основы комплексной системы текущего и оперативного планирования работы флота», которую Анатолий Сергеевич успешно защитил в 1990 г.

С 1988 г. А. С. Бутов сначала работал проректором по учебной работе, а затем (с 1992 г.) — ректором родного вуза. Присвоение в 1994 г. институту статуса университета явилось несомненным признанием заслуг коллектива вуза в деле подготовки высококвалифицированных кадров, научных разработок и результатов их внедрения в практику водного транспорта и смежных отраслей, а также организаторской, научно-педагогической и общественной деятельности его ректора — А. С. Бутова, который был и навсегда останется первым ректором университета.

С целью внедрения ИТ в образовательный процесс и подготовку квалифицированных специалистов этого направления для отрасли А. С. Бутов создал в 1989 г. «Кафедру автоматизированных систем управления на речном транспорте» (АСУРТ), преобразованную позже (в 1994 г.) в «Кафедру информатики и эконометрии». В 2001 г., после выделения «Кафедры прикладной информатики в экономике», она получила новое название — «Кафедра эконометрии». В 2005 г. эта кафедра была преоб-

разована в «Кафедру математического моделирования и эконометрии», которую возглавил канд. техн. наук, В. А. Бабурин, научным руководителем кандидатской диссертации которого был А. С. Бутов.

С теплотой, глубоким уважением и величайшей признательностью вспоминают об Анатолии Сергеевиче его многочисленные ученики, соратники — люди, которым довелось работать вместе с ним и под его началом. «Я познакомилась с А. С. Бутовым будучи студенткой третьего курса, — вспоминает канд. экон. наук, проф. И. Д. Шилкина, — к этому времени мы успели уже «окунуться» в изучение таких дисциплин, как программирование, экономическая кибернетика, математическая логика, но встреча с преподавателем А. С. Бутовым, читавшим курс «Управление флотом и портами», определила судьбы многих из нас. Одних полученные впечатления повергли в шок, других увлекли методами в экономике, математическим моделированием, статистикой на многие годы. Не все ученики Анатолия Сергеевича остались работать в институте и в системе речного флота, но те знания, а, может быть, мироощущение и жизненную мудрость, которые мы впитали при общении с ним, позволили многим успешно трудиться и в отраслях, далеких от речного транспорта.

Следующий период общения с Анатолием Сергеевичем прошел в Вычислительном центре пароходств Северо-Западного бассейна, куда пришли многие выпускники после окончания инженерно-экономического факультета. Все мы были под впечатлением лекций, практических занятий и написания дипломного проекта под руководством А. С. Бутова и рвались в аспирантуру в надежде реализовать желание заняться наукой. Анатолий Сергеевич настойчиво рекомендовал нам поработать несколько лет, поближе познакомиться с речным транспортом, разобраться в нуждах и проблемах отрасли и лишь потом идти в аспирантуру. Этот мудрый совет мы оценили несколько лет спустя, когда стали аспирантами и у нас не возникали проблемы в процессе общения с работниками речного транспорта и мы не выглядели в их глазах «чистыми теоретиками».

Учеба в аспирантуре была самым интересным и полезным для нас периодом общения с А. С. Бутовым. Мы повзрослели, и общение с любимым учителем часто проходило в виде бесед и дискуссий, конечно, не на равных, но с неизменным вниманием и уважением Анатолия Сергеевича к мыслям учеников. Он не давал прямых указаний, не навязывал своего мнения молодым ученым, но порой «случайно» оброненная фраза или пометки на полях рукописи позволяли после месяцев раздумий получить неплохой результат. Анатолий Сергеевич очень много времени и сил отдавал своим ученикам. Как правило, он мог уделять нам время поздними вечерами после напряженного трудового дня в должности начальника Вычислительного центра, а впоследствии — проректора. Все ученики терпеливо сносили часы ожидания в приемной с надеждой обсудить новые идеи или узнать замечания по сданным ранее материалам. И когда он успевал все прочитать?! На полях всегда было много пометок. Он все отработывал по полной программе и не терпел «халтуры» от нас. От него можно было схлопотать взбучку за «четверку», полученную при сдаче кандидатского экзамена, или за некачественно подготовленную статью».

«Когда в 1987 г. вышла книга А. С. Бутова «Имитационное моделирование работы флота на ЭВМ», я получил от автора экземпляр с дарственной надписью, — вспоминает Владимир Шилкин — один из первых аспирантов А. С. Бутова, директор Финансовой дирекции ПАО «Балтийский банк». В ней Анатолий Сергеевич выразил надежду на мой «серьезный вклад в управление на речном транспорте». Наверное, я не оправдал ожиданий учителя, хотя защитил диссертацию и два года работал начальником Вычислительного центра Северо-Западного речного пароходства. Но я горжусь тем, что моим учителем был и навсегда останется Анатолий Сергеевич Бутов. Защитив диссертации и много лет проработав в различных отраслях, мы — ученики А. С. Бутова, теперь понимаем, каков был масштаб его личности. На нашем жизненном пути именно он был лучшим педагогом, учителем с большой буквы, лучшим ученым, создавшим свою школу, лучшим руководителем, которого не только уважали, но и любили подчиненные».

А. С. Бутов много сделал для развития эксплуатационной науки на водном транспорте, внедрения результатов научных исследований в практику его работы, подготовки высококвалифицированных кадров, обладающих знаниями ИТ и математических методов в экономике, способных отвечать вызовам быстро меняющейся действительности. Последователь своего учителя, доктора

технических наук, профессора А. П. Ирхина, А. С. Бутов явился одним из основоположников внедрения методов математического моделирования на водном транспорте. В частности, ему принадлежит приоритет в разработке методологии и методики имитационного моделирования для нормирования продолжительности технологических операций и процессов на водном транспорте. В архиве А. С. Бутова десятки изданных научных трудов, учебники, сборники трудов, выпущенные под его редакцией, авторское свидетельство, материалы научно-исследовательских разработок, в том числе опубликованные на иностранных языках.

«Когда в 1986 г. я заканчивал учебу в ЛИВТе на экономическом факультете, — вспоминает Василий Кострица, заместитель генерального директора по строительным материалам «Группы ЛСР» — у меня не было четких планов по трудоустройству — вариантов было много. Именно в этот момент состоялось мое первое знакомство с Анатолием Сергеевичем Бутовым. Он тогда был начальником Вычислительного центра пароходств Северо-Западного бассейна и предложил мне работу. Сразу могу сказать, что впоследствии я ни разу не пожалел о своем выборе. В Вычислительном центре пароходств Северо-Западного бассейна я отработал положенные по распределению три года. Работа была разноплановой, связанной с большим количеством командировок и чрезвычайно интересной, а главное, она была очень востребована на предприятиях речного флота, где мы с успехом внедряли свои разработки. В течение этого времени Анатолий Сергеевич внимательно следил за моей работой, направлял и поддерживал меня, а в 1989 г. от него поступило предложение продолжить обучение в аспирантуре под его научным руководством. Это были самые интересные, творческие три года! То, что сейчас считается стандартным решением, тогда мы делали впервые. На примере Осетровского порта Ленского речного пароходства впервые разрабатывалась модель управления портом как водно-транспортным узлом. Одним из ключевых элементов этой модели была автоматизированная система межмашинного обмена информацией между железной дорогой и портом, что позволяло «видеть» грузы еще на подходе и применять методы имитационного моделирования для планирования расстановки флота еще до его прибытия в порт. Знания и отношение к делу, которые я получил, работая с учителем, позволили мне добиться дальнейших профессиональных успехов. До сих пор я с огромной теплотой вспоминаю годы совместной работы с Анатолием Сергеевичем. Во многом своими успехами я обязан ему, ведь именно он научил меня системному подходу к решению любой задачи, а знания, полученные тогда, помогают мне и сейчас. Вспоминаю его харизму и замечательные человеческие качества, отзывчивость и готовность незамедлительно прийти на помощь в трудную минуту. Таких людей как Анатолий Сергеевич мало, но они иногда встречаются, как редкие и крупные бриллианты».

А. С. Бутов работал для людей. Его отличало то, что он не только *слушал* других, но и *слышал* их, а это большая ценность в человеке, тем более в руководителе. Он руководил институтом, а впоследствии и университетом в тяжелые «лихие 90-е» годы. Однако и тогда, в сложное время, Анатолий Сергеевич находил возможность улучшить материальное положение сотрудников, развивая коммерческое направление деятельности — при нем была создана сеть филиалов вуза. Многие сотрудники улучшили свои жилищные условия за счет перевода ректором в жилой фонд одного из общежитий, что потребовало большого труда и настойчивости. Была открыта типография, начался процесс выпуска учебной литературы. Все дела, за которые брался Анатолий Сергеевич, он всегда доводил до конца.

Общественным признанием заслуг А. С. Бутова явилось присвоение в июле 2002 г. малой планете № 13049 имени «BUTOV». Университет помнит своего первого ректора. И эта память отражена в экспозиции музея университета, где можно увидеть часть звездного неба с малой планетой «BUTOV». Там, где под руководством профессора А. П. Ирхина аспирант А. С. Бутов участвовал в разработке методического обеспечения имитационной электромеханической модели транспортного процесса, создана современная учебная лаборатория моделирования транспортно-го процесса, которой присвоено его имя. Направление научной и педагогической деятельности Анатолия Сергеевича отражает современное название созданной им в 1989 г. кафедры математического моделирования и прикладной информатики.

Память о человеке остается тогда, когда он живет не для себя!

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429

THE INFLUENCE OF CONTAINER HANDLING EQUIPMENT TECHNICAL LIMITATIONS ON THE OPERATIONS PRODUCTIVITY

A. L. Kuznetsov¹, A. D. Semenov², V.P. Levchenko¹

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

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

To calculate the number of container terminal equipment the information on the annual cargo traffic distribution and the handling equipment productivity is required. The wrong calculations in the hourly tasks for operation or productivity can lead to the wrong decisions in the number of needed equipment, the impossibility to handle the growing cargo traffic. Therefore, it is necessary to pay a special attention to the methods of calculation and generation of the specified parameters. However, designing a new terminal or analyzing the activity of existing one the specialists do not consider some technical limitations of certain handling equipment that influence on its productivity. Particularly, the reduction in productivity of warehouse loading cranes at high filling of the stack is not taken into account. As the stack occupancy rate approaches one the number of permutations per container doubles, that is connected with impossibility to place containers on the tier designed for spreader movement. In this case an operator has to place some boxes on the top level of the stack and then put them back. The influence of the described technology on the productivity cannot be revealed by the traditional mathematical methods. To evaluate the impact of this parameter a simulation model of the warehouse loading crane operation is created. The model allows us to prove that the productivity decreases when reaching 90% of the warehouse's occupancy. The suggested method can be used to define the probability density function of handling equipment more correctly.

Keywords: seaport, dry port, container terminal, productivity, handling equipment, selectivity, simulation modelling, gantry crane, stack organization, warehouse capacity.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. "The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.

УДК: 656.615

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

А. Л. Кузнецов¹, А. Д. Семенов², В. П. Левченко¹

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

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

Для расчета количества перегрузочного оборудования необходима информация о распределении годового грузопотока и о производительности перегрузочного оборудования. Ошибки в определении часового задания на операции или расчете производительности могут привести к неправильному определению необходимого количества технологических ресурсов, невыполнению растущего грузопотока и, как следствие, к снижению эффективности работы терминала. В работе акцентируется внимание на том, что все эти факторы требуют особого внимания к методам расчета и генерации указанных величин. Доказывается, что при проектировании терминалов и анализе их оперативной деятельности современные методы расчета производительности не учитывается влияние технических ограничений перегрузочного оборудования.

В частности, не принимается во внимание снижение производительности складских перегружателей при высоком заполнении штабеля. В статье рассматривается проблема, возникающая при приближении коэффициента занятости штабеля к единице: количество перестановок на один контейнер резко увеличивается, поскольку из-за невозможности заполнения проносного яруса контейнеры, временно поставленные в верхний ярус, должны быть возвращены в исходную позицию. Влияние описанной особенности технологии выполнения операций на производительность не может быть оценено традиционными математическими (алгебраическими) методами. В связи с этим для численной оценки влияния данного фактора предлагается использовать имитационную модель работы складского перегружателя. В результате проведенного исследования определена зависимость производительности от занятости штабеля с учетом увеличения числа перестановок. Доказано, что производительность контейнерных перегружателей снижается при достижении 90 % занятости склада. Кроме того, разработанный метод может быть использован для получения более точного распределения производительности перегрузочного оборудования.

Ключевые слова: морской порт, сухой порт, контейнерный терминал, производительность, перегрузочное оборудование, селективность, имитационное моделирование, козловой кран, организация штабеля, вместимость склада.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.

Введение (Introduction)

В проектировании контейнерного терминала особое место занимает расчет необходимого количества технологических ресурсов. Недостаток перегрузочного оборудования приведет к снижению пропускной способности терминала и к невыполнению заданного грузопотока. В связи с этим большое внимание при расчетах должно уделяться исходным параметрам: часовому заданию на операциях и производительности перегрузочного оборудования.

Вопросам определения и генерации часового задания в последнее время было посвящено множество работ. В частности, в работе [1] предлагается рассчитывать задание на операцию исходя из годового грузопотока и его неравномерности в различные периоды времени, которая формирует некоторую структуру неравномерности грузопотока. В работе [2] предлагается метод мягкой генерации грузопотока, который позволяет задавать распределение грузопотока на основании количественных данных, а также качественных суждений. В работе [3] для прогнозирования грузопотока контейнерного терминала предлагается использовать специализированную искусственную нейронную сеть. В то же время вопросу расчета производительности уделяется не так много внимания. Как правило, расчет производительности осуществляется на основании данных о продолжительности перегрузочного цикла, времени переезда между операциями, структуры штабеля и занятости склада [4]–[7]. Однако в традиционных расчетах не учитывается влияние ряда технических особенностей применяемого типа оборудования на производительность операций. В то же время оценка влияния данных параметров невозможна обычными математическими методами и требует применения имитационного моделирования.

В данной работе рассматривается влияние технических особенностей работы специализированного складского перегружателя (RTG или RMG) на производительность выполняемых им операций. Для оценки этих параметров была разработана специализированная имитационная модель.

Методы и материалы (Methods and materials)

В общем случае под производительностью понимают количество движений, которое определенный тип оборудования может сделать за час¹. В то же время выделяют техническую, экс-

¹ Свод правил СП 350.1326000–2018. Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Стандартинформ, 2018. — 218 с.

плуатационную и коммерческую производительность. Техническая производительность, которая указывается в документации производителя, как правило, определяется по следующей формуле:

$$P_T = \frac{3600}{T_{\text{движ}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{движ}}$ — время выполнения одного перемещения контейнера в штабеле, с.

Эта производительность показывает максимальное количество движений, которое оборудование способно выполнить за час. Данное значение не может использоваться при расчетах, поскольку любая технология требует ряда вспомогательных операций, в частности переезда перегрузочного оборудования из одной позиции в другую. В связи с этим при расчетах используют не техническую, а эксплуатационную производительность, получаемую путем учета соответствующих факторов в цикле движения с помощью специального коэффициента $k \leq 1$ перехода от технической к эксплуатационной производительности: $P_э = kP_T$.

Кроме того, операции на контейнерной площадке требуют дополнительных непроектируемых движений — перестановок контейнеров, необходимых для того, чтобы достать целевой [8]. Строго говоря, основным параметром, характеризующим коммерческую деятельность терминала, является не общее количество выполненных движений, а количество движений по запросу клиента (производительных движений). Именно эта «коммерческая производительность», определяемая как количество движений в интересах клиента в единицу времени, должна использоваться в расчетах пропускной способности. Коммерческая производительность связана с эксплуатационной производительностью через коэффициент, который называется *селективностью контейнера*. Под селективностью понимается отношение количества коммерческих движений к общему числу движений при выборке контейнеров. Селективность, пересчитанная на один контейнер, в таком случае определяется в следующем виде:

$$S = \frac{1}{N_{\text{движ}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{движ}}$ — среднее количество движений на один контейнер.

Тогда коммерческая производительность определяется по формуле

$$P_k = SP_э. \quad (3)$$

Среднее количество движений на один контейнер может быть получено эмпирическим путем (с помощью статистических наблюдений) или теоретически. Так, в ряде работ [9]–[11] указывается, что среднее количество движений на один контейнер для складских перегружателей с вертикальным доступом может быть определено с помощью формулы

$$N_{\text{движ}} = \frac{h+1}{2}, \quad (4)$$

где h — средняя высота штабелирования.

Указанная формула позволяет построить зависимость среднего числа движений от занятости склада. Действительно, последний параметр может быть определен как функция от средней высоты складирования:

$$k_{\text{зан}} = \frac{E_{\text{факт}}}{E_{\text{max}}} = \frac{hWL}{h_{\text{max}}WL} = \frac{h}{h_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{факт}}$ — фактическое количество контейнеров в штабеле;

E_{max} — вместимость склада;

L — количество секций в штабеле;

W — количество рядов в штабеле;

h — фактическая средняя высота складирования;

h_{max} — максимальная высота складирования.

Отсюда производительность перегрузочного оборудования в дальнейшем может быть определена с помощью одного параметра — коэффициента занятости склада. При этом формула (4) не учитывает ряд технических особенностей складских перегружателей. В частности, штабель в транспортно-технологической схеме с RTG/RMG обычно сформирован в виде контейнерных блоков, расположенных в просвете портала перегружателя. Каждый блок, в свою очередь, состоит из отдельных секций, допускающих хранение контейнеров рядами в несколько ярусов. Каждая позиция, в которой располагается контейнер, называется *ячейкой*, проекция ячейки на поверхность терминала — *наземным слотом* (рис. 1).

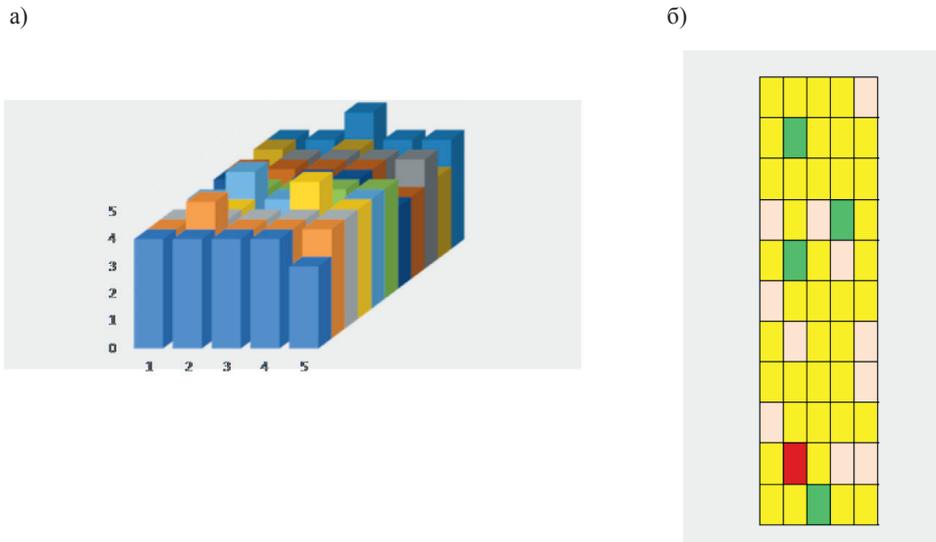


Рис. 1. Проекция штабеля на площадку терминала:
а — модель штабеля; б — наземные слоты

Размеры портала крана определяют характеристики штабеля: ширина штабелирования в одной секции обычно составляет шесть – восемь рядов и включает проезда для ТС, высота — пять – семь рабочих и один проносной ярус [11]. Рабочее пространство, доступное для конкретного перегружателя, характеризуется при этом, соответственно, как $(6 + 1, 5 + 1)$.

Как правило, секции заполняются так, чтобы при любой занятости штабеля обеспечить доступ к контейнеру из нижнего яруса, перемещая блокирующие контейнеры в пределах только этой секции. Так, если высота складирования — пять ярусов, а ширина — шесть рядов, то на пятом ярусе могут находиться только два контейнера. В таком случае при полной занятости штабеля имеется возможность выбрать нижний контейнер, поместив стоящие над ним контейнеры на пятый ярус (рис. 2).

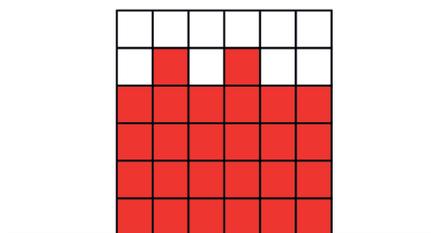


Рис. 2. Структура секции

В то же время такая структура может потребовать дополнительных движений. Так, если секция занята полностью и необходимо выбрать контейнер из нижнего яруса, оператор крана будет вынужден сделать в два раза больше движений: n движений, чтобы достать целевой контейнер, и $n - 1$ движений, чтобы вернуть контейнеры в исходную позицию для сохранения принятой структуры секции (рис. 3).

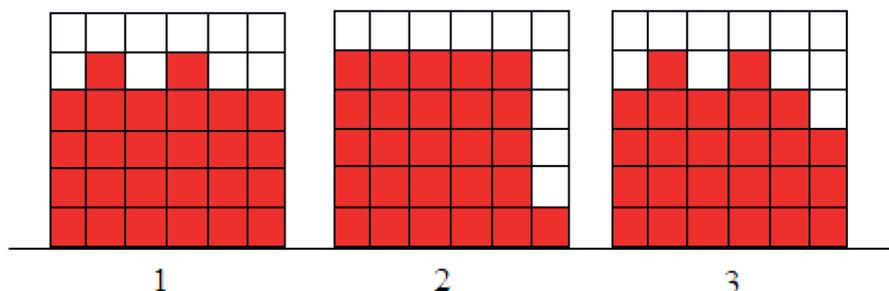


Рис. 3. Выбор и возврат контейнеров: 1 — исходное состояние штабеля;
 2 — контейнеры, стоящие над целевым, переносятся в пятый ярус;
 3 — целевой контейнер выбирается из штабеля, контейнеры с пятого яруса переставляются обратно

Таким образом, при приближении занятости склада к 100 %, среднее количество движений на один контейнер будет увеличиваться. Аналитические возможности расчета этого увеличения отсутствуют, выявление влияния данного фактора с помощью статистического наблюдения представляется трудоемкой задачей, поскольку требует большого объема выборки и особых условий работы терминала. В то же время современные методы компьютерного моделирования позволяют провести анализ работы цифрового двойника изучаемого объекта и получить необходимые данные [12]. В связи с этим для выявления влияния описываемого технического ограничения на производительность оборудования используется имитационное моделирование.

Для оценки производительности перегрузочного оборудования в первую очередь необходимо использовать адекватные методы генерации штабеля. Некорректные методы генерации приведут к ложным результатам, заложив неверный фундамент сложных моделей расчета производительности. Далее описывается метод генерации контейнерного штабеля в виде блока с заданной структурой. Для простоты считается, что в штабеле находятся контейнеры одного типоразмера.

В модели приняты следующие обозначения:

E — количество контейнеров в штабеле;

V — вместимость штабеля;

W — количество рядов в штабеле;

L — количество секций в штабеле;

$H(j)$ — максимальная высота складирования в j -м ряду;

$\text{cont}(i, j)$ — количество контейнеров в i -й секции, j -м ряду;

a — сгенерированный номер секции для определенного контейнера;

b — сгенерированный номер ряда для определенного контейнера.

Исходными данными в модели является количество контейнеров E , находящихся на складе. Если E равно нулю, то генератор создает пустой штабель. Если заданное количество контейнеров превышает вместимость штабеля, то программа генерирует полностью занятый штабель согласно схеме секций (табл. 1, рис. 2), а контейнеры, которые в него не помещаются, игнорируются.

Таблица 1

Схема секции

	Максимальная высота складирования в ряду					
Номер ряда	1	2	3	4	5	6
Количество ярусов	4	5	4	5	4	4

Для генерации штабеля задается схема погрузки — массив последовательности размещения контейнеров в штабеле (табл. 2). Номер в ячейке обозначает, в каком порядке контейнеры ставятся в штабель. Как видно из таблицы, сначала все контейнеры ставятся в первый ярус и первый ряд, затем — во второй ряд и т. д.

Схема погрузки КТК в штабель

Ярус	31	32	33	34	35	36
	25	26	27	28	29	30
	19	20	21	22	23	24
	13	14	15	16	17	18
	7	8	9	10	11	12
	1	2	3	4	5	6
Ряд						

Предполагается, что контейнеры укладываются не по секциям, а по рядам, т. е. первые контейнеры укладываются только в первый ряд первого яруса. Когда он полностью занят, программа переходит ко второму ряду, заполняя весь его первый ярус по всем секциям. Модель определяет, какое количество рядов, согласно схеме погрузки, может быть заполнено полностью по всем секциям следующим образом:

$$N = \left\lfloor \frac{E}{L} \right\rfloor, \quad (6)$$

где N — количество рядов, которые могут быть заполнены по всем секциям;

символ $\lfloor \dots \rfloor$ обозначает округление содержимого до ближайшего наименьшего целого.

Заполнение рассчитанного количества рядов осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 4.

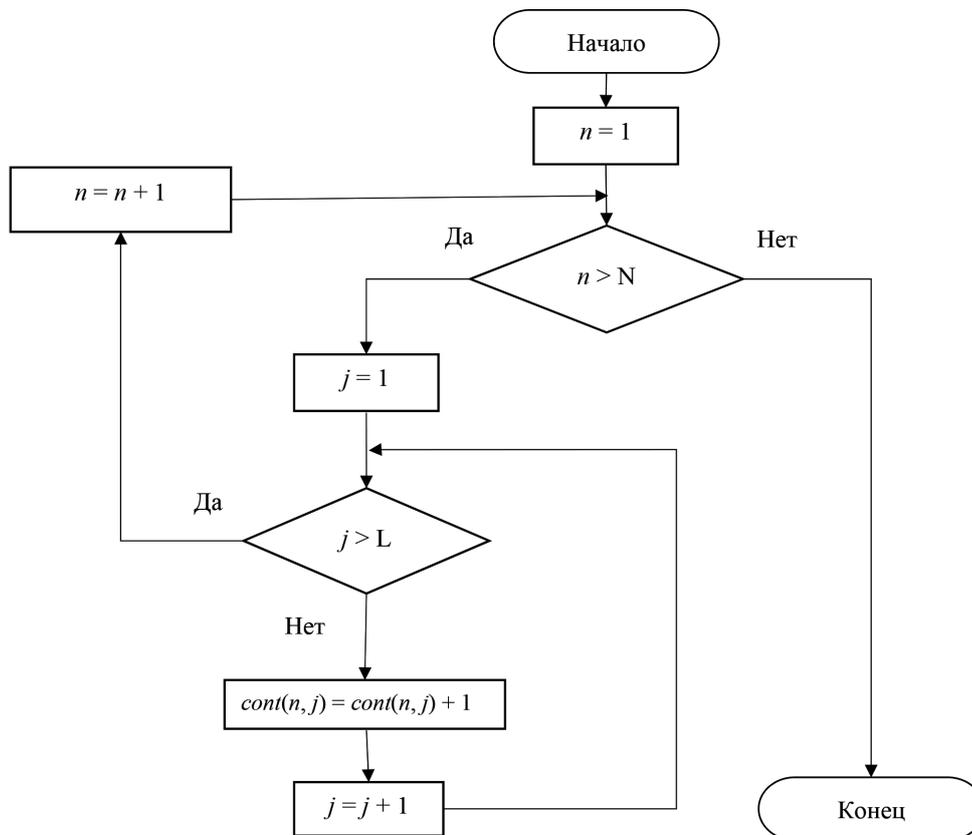


Рис. 4. Алгоритм заполнения штабеля рассчитанного количества рядов

Далее программа определяет, какое количество контейнеров не может заполнить весь ряд:

$$e = E - NL. \quad (7)$$

Эти контейнеры распределяются в штабеле случайным образом согласно алгоритму, представленному на рис. 5.

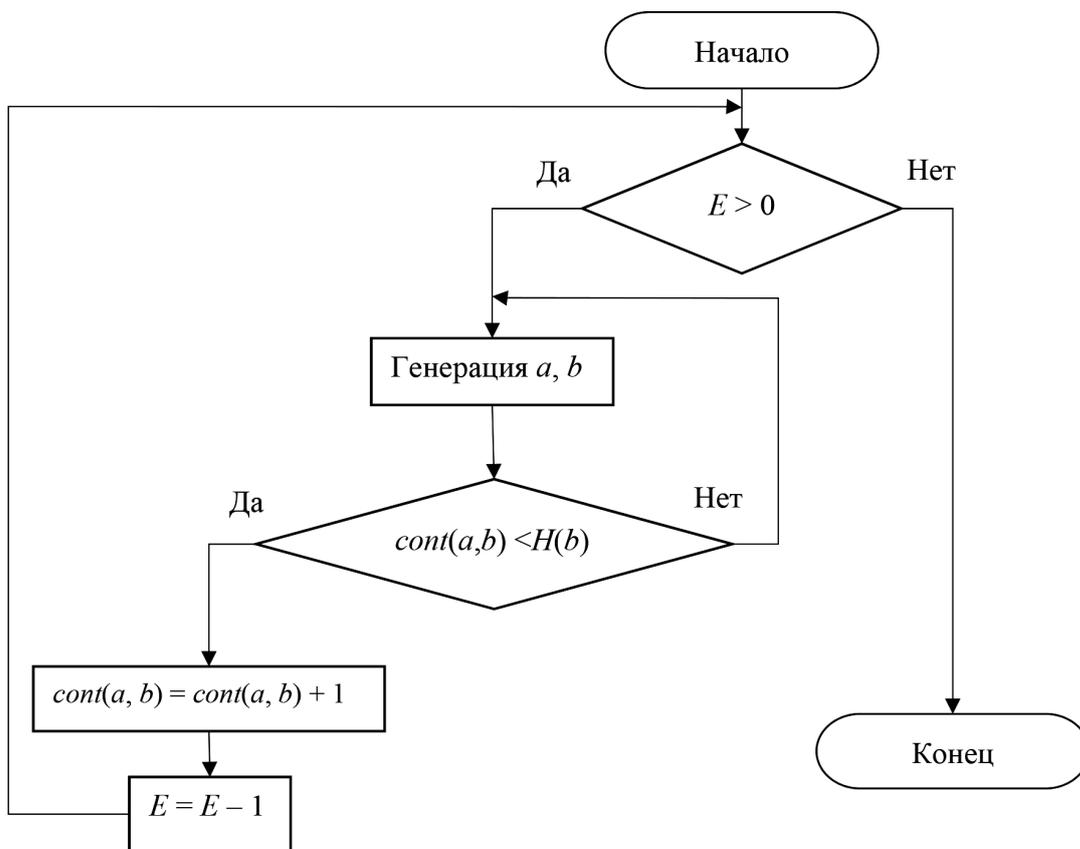


Рис. 5. Алгоритм формирования штабеля случайным образом

Результатом работы алгоритма является схема распределения локальной высоты штабеля контейнеров по наземным слотам (рис. 6). В каждой ячейке таблицы представлено количество контейнеров, стоящих в данном наземном слоте.

№ секции	Модель штабеля					
	1	2	3	4	5	6
1	4	4	4	5	4	4
2	4	4	4	5	4	4
3	1	5	4	5	4	4
4	4	5	4	5	4	4
5	4	5	4	5	4	4
6	4	5	4	5	4	4
7	2	5	4	5	4	4
8	4	4	4	5	4	4
9	4	5	3	5	4	4
10	4	5	3	5	4	4
11	4	5	4	5	3	4
12	4	5	4	5	4	4
13	4	3	4	5	4	4
14	1	5	4	5	4	4
15	4	4	4	5	4	4

Рис. 6. Результат генерации

Для определения трудоемкости выборки используется имитационное моделирование. В модели задается количество контейнеров N_{cont} , которое должно быть выбрано из штабеля. Предполагается так же, что все контейнеры обезличены, т. е. необходимо выбрать случайные N_{cont} . В связи с этим адрес контейнера (a, b, c), где a — номер секции, b — номер ряда, c — ярус контейнера, генерируется случайным образом.

Для того, чтобы определить необходимое количество контейнеров для выборки, модель проверяет, есть ли в секции, где стоит контейнер, ряд, в котором можно сделать перестановку. Если такого ряда нет, то RTG будет вынужден поставить «мешающие» контейнеры в верхний ярус, а потом вернуть их на место, т. е. количество непроизводительных движений увеличивается в два раза (рис. 7).

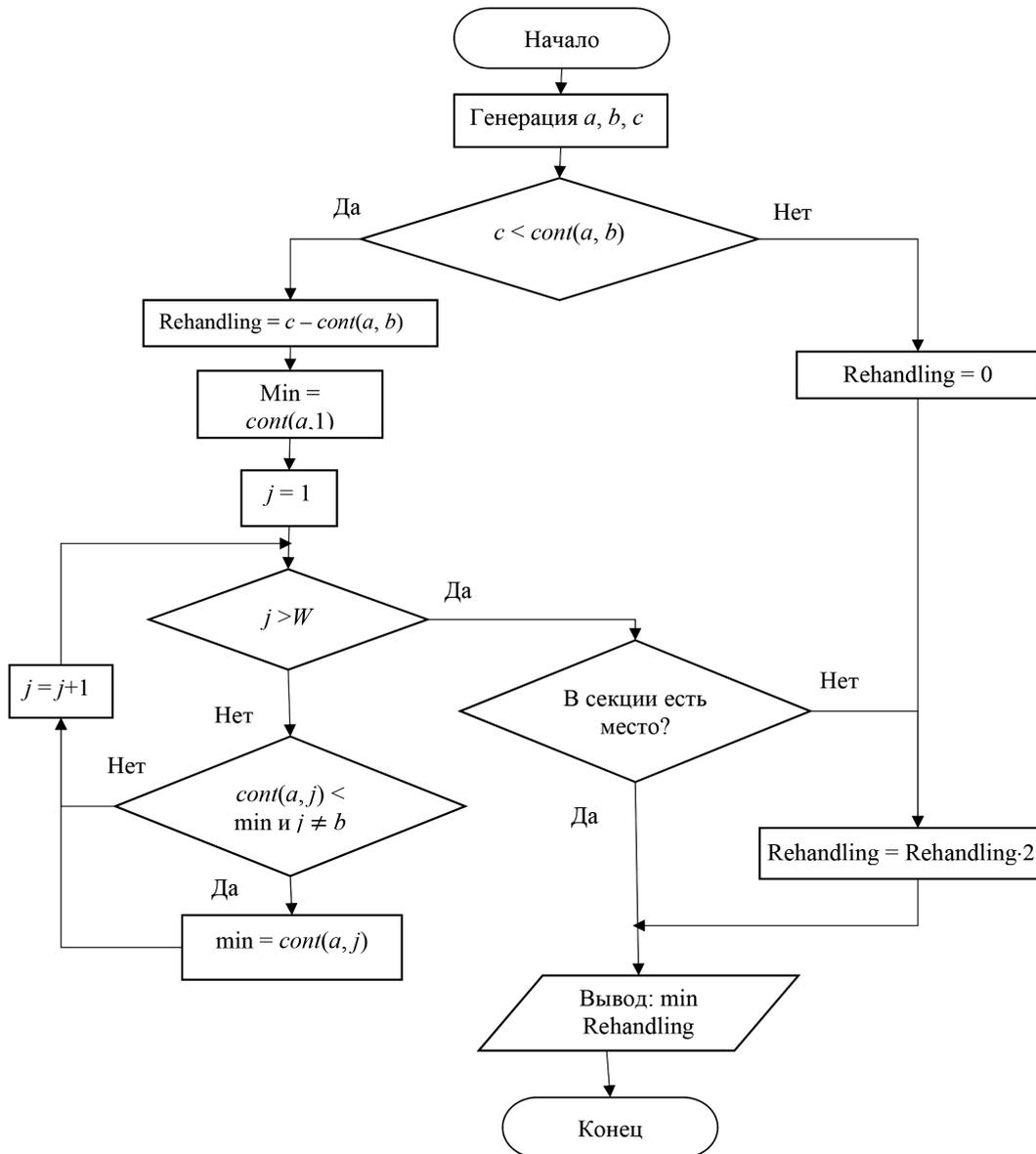


Рис. 7. Алгоритм определения параметров перестановки

Далее все контейнеры, которые мешают выборке целевого, переставляются в ряд с наименьшим числом контейнеров. В модели это отражается следующим образом:

$$cont(a, b) = cont(a, b) - 1; \quad (8)$$

$$min = min + 1. \quad (9)$$

Если в секции нет места для перестановок, то программа выводит число перестановок, умноженное на два, и отнимает из $cont(a, b)$ единицу.

Результаты любого исследования методами имитационного моделирования не могут быть использованы без доказательства адекватности модели. В данном случае доказательство осуществляется путем проверки логики работы модели. Для этого предусмотрена «история» штабеля: программа отображает фотографии штабеля после выборки одного целевого контейнера (рис. 8).

3	Модель штабеля						4	Модель штабеля						5	Модель штабеля					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	4	4	5	4	4		4	4	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4
	4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4		4	5	4	5	4	4

Рис. 8. «История» изменения штабеля

Данная информация сравнивается с выходными данными модели, т. е. с адресом контейнера и рассчитанным числом перестановок (табл. 3).

Таблица 3

Выходные данные модели

Контейнеры на погрузку поезда				Количество движений
Порядковый номер	Секция	Ряд	Ярус	
3	6	2	4	3
4	18	2	4	3

Результаты (Results)

Описанная в данной работе модель позволяет выявить зависимость между числом движений крана RTG при выборке контейнеров из штабеля и занятостью склада. Для этого задается массив изменения количества контейнеров в штабеле и количество экспериментов, проводимых при данной занятости. В результате такого моделирования получается зависимость, представленная на рис. 9.

Для сравнения результаты модели сопоставляются с теоретическим значением $\frac{h+1}{2}$ (рис. 10). Как видно из этого рисунка, данные практически совпадают с теоретической зависимостью за исключением крайних точек.



Рис. 9. Изменение количества движений в зависимости от занятости штабеля



Рис. 10. Сравнение результатов модели с теоретической формулой

Обсуждение (Discussion)

Полученные данные позволяют определить производительность крана RTG, скорректированную с учетом описанных ранее технических ограничений. Как видно из рис. 10, производительность перегружателя будет снижаться при достижении 90 % заполнения штабеля (рис. 11). Такое снижение должно учитываться при проектировании контейнерных терминалов, в частности при расчете вместимости контейнерного склада и количества перегрузочного оборудования.

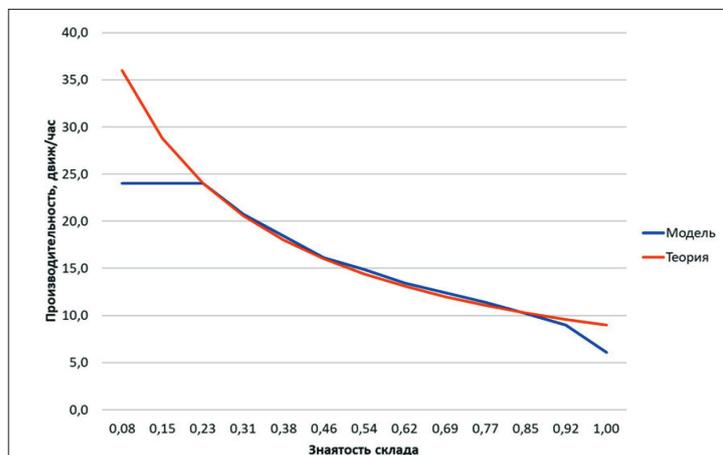


Рис. 11. Изменение производительности крана RTG

Кроме того, предложенный метод моделирования работы контейнерного перегружателя позволяет получить распределение вероятностей продолжительности одной выборки контейнера из штабеля с учетом перестановок (рис. 12.)

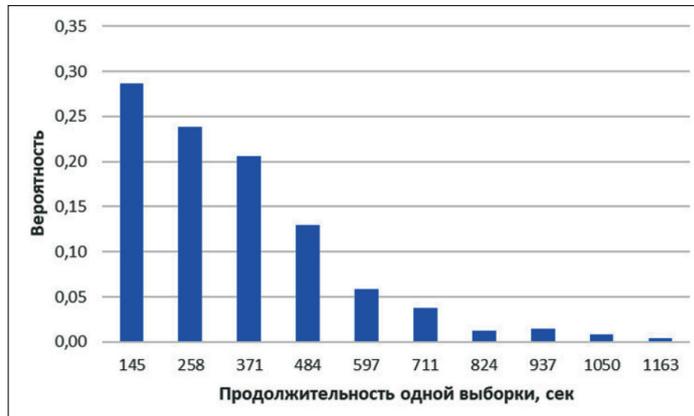


Рис. 12. Гистограмма распределения продолжительности выборки с перестановками

Кроме того, транспортно-технологическая схема с RTG предполагает еще одно важное техническое ограничение. При организации штабеля особое внимание уделяется положениям контейнеров, при которых возможно их опрокидывание или соскальзывание под воздействием ветра¹. В обиходе такие положения называются «свечками» и «колодцами» (рис. 13).

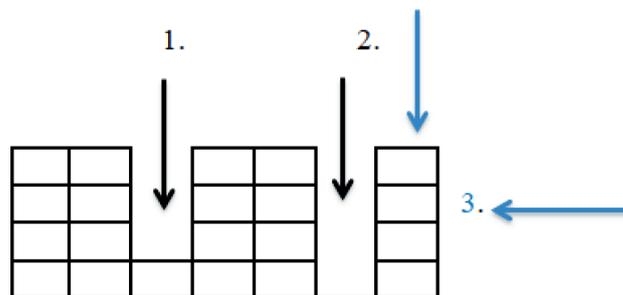


Рис. 13. Схема секции с нарушением техники безопасности:
 1, 2 — «колодцы»; 3 — «свечка»

Появление «свечек» или «колодцев» требует выполнения дополнительных движений, направленных на формирование секции, что также снижает производительность операций. Дальнейшее исследование представленной в статье проблемы предполагает моделирование работы крана RTG при выборке контейнеров с учетом устранения возникающих описанных ранее опасных положений контейнеров в штабеле.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В статье доказано, что фактическая зависимость количества движений на один контейнер от занятости склада в козловой транспортно-технологической схеме отличается от теоретической формулы.

2. С помощью специальной имитационной модели выявлено, что производительность контейнерного перегружателя начинает снижаться при достижении 90 % занятости склада за счет влияния технических особенностей этого оборудования.

¹ ГОСТ Р ИСО 3874–2008. Контейнеры грузовые серии 1. Перегрузка и крепление. М.: Стандартинформ, 2008. 62 с.

3. Полученные зависимости производительности от занятости штабеля могут использоваться при расчете необходимого количества перегрузочного оборудования, а также вместимости контейнерного склада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.

2. Кузнецов А. Л. Методы мягких вычислений для генерации неоднородных потоков событий в моделировании транспортных систем / А. Л. Кузнецов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4-4 (42). — С. 186–190.

3. Gosasang V. A comparison of traditional and neural networks forecasting techniques for container throughput at Bangkok port / V. Gosasang, W. Chandraprakaikul, S. Kiattisin // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2011. — Vol. 27. — Is. 3. — Pp. 463–482. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80022-2.

4. Handbook of terminal planning / edited by J. W. Böse. — Springer Science & Business Media, 2011. — Vol. 49. — 433 p.

5. Murty K. G. A decision support system for operations in a container terminal / K. G. Murty et al // Decision Support Systems. — 2005. — Vol. 39. — Is. 3. — Pp. 309–332. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.002.

6. Vis I. F. A. A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal / I. F. A. Vis // International Journal of Production Economics. — 2006. — Vol. 103. — Is. 2. — Pp. 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.

7. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гулятьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.

8. Иванова В. И. Оптимизированный расчет производительности перегрузочной машины при обработке контейнеров на терминале / В. И. Иванова, О. А. Маликов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2008. — № 2 (15). — С. 45–49.

9. Гомбосэд С. Технической оснащения контейнерных площадок / С. Гомбосэд, О. Б. Маликов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2013. — Т. 3. — № 1. — С. 7–16.

10. Kuznetsov A. Do boxes really have a —diggingl effect? / A. Kuznetsov // Cargo systems. — 2008. — Pp. 42–43.

11. Кириченко А. В. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — С. 158–173.

12. Dragović B. Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool / B. Dragović, E. Tzannatos, N. K. Park // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Is. 1. — Pp. 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. “Set theory model for the assessment of the container terminal’s operational resources.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.

2. Kuznetsov, Alexander L., Oleg A. Isotov, Anton D. Semenov, and Sergey V. Smolencev. “Application of soft computing for generation of heterogeneous events flow in transport system modeling.” *Marine Intelligent Technologies* 4- 4(42) (2018): 186–190.

3. Gosasang, Veerachai, Watcharavee Chandraprakaikul, and Supaporn Kiattisin. “A comparison of traditional and neural networks forecasting techniques for container throughput at Bangkok port.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 27.3 (2011): 463–482. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80022-2.

4. Böse, Jürgen W., ed. *Handbook of terminal planning*. Vol. 49. Springer Science & Business Media, 2011.
5. Murty, Katta G., Jiyin Liu, Yat-wah Wan, and Richard Linn. "A decision support system for operations in a container terminal." *Decision Support Systems* 39.3 (2005): 309–332. DOI: 10.1016/j.dss.2003.11.002.
6. Vis, I. F. A. "A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal." *International Journal of Production Economics* 103.2 (2006): 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.
7. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Assessment of required technological resources by statistical simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.
8. Ivanova, V.I., and O.A. Malikov. "Optimized Calculation of the Overloading Machine Efficiency when Handling Containers at the Terminal Station." *Proceedings of Petersburg Transport University* 2(15) (2008): 45–49.
9. Gombose, S., and O. B. Malikov. "Technical equipment of container yards." *Modern Problems of Russian Transport Complex* 3.1 (2013): 7–16.
10. Kuznetsov, A. "Do boxes really have a —digging effect?." *Cargo systems* (2008): 42–43.
11. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznetsov, A. A. Davydenko, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Morskaya konteynernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A.V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017. 158–173.
12. Dragović, Branislav, Ernestos Tzannatos, and Nam Kuy Park. "Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29.1 (2017): 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Семенов Антон Денисович — диспетчер
 ООО «Логистический парк «Янино»
 Российская Федерация, Ленинградская область,
 Всеволожский район, д. Янино-1,
 Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
 e-mail: asemyonov054@gmail.com
Левченко Вероника Павловна — инженер
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: levchenko.veronika@list.ru,
kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Semenov, Anton D. — Dispatcher
 Yanino Logistics Park LLC
 Vsevolozhsky District, Yanino-1 village, Trade
 and logistics zone Yanino-1, No. 1, Leningrad Region,
 Russian Federation
 e-mail: asemyonov054@gmail.com
Levchenko, Veronika P. — Engineer
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: levchenko.veronika@list.ru,
kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2019 г.
 Received: May 13, 2019.

THE ASSESSMENT OF THE VESSEL'S LONGITUDE DEAD RECKONING METHOD ERROR

V. V. Deryabin

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

An expression for the upper bound of the absolute value of the vessel's geodetic longitude dead reckoning method error has been derived in the paper. The error appears due to simplifying the equation of latitude dead reckoning. The simplification is the substitution of the transcendental function in the equation for the constant value which equals the function value for the minimum absolute value of the vessel's latitude. The derived formula includes the upper bound of the absolute value of the latitude dead reckoning method error; the maximum absolute value of the east speed component; the sailing duration; the latitude maximum absolute value during sailing; and the ellipsoid parameters which are used for calculating the vessel's coordinates. The expression for the upper bound is valid if the vessel's geodetic height remains constant during sailing. It does not take into account input data errors, errors of rounding in the navigational electronic computer and methodical errors caused by integration of the north and the east velocity components (provided they are set as the table values). Corresponding error calculations have been carried out for the different speed modes and time of vessel sailing. The calculations results are consistent with the considerations which could be made on the basis of the derived expression. The formula for the upper bound of the vessel's longitude method error does not work in the vicinities of the poles because the upper bound tends to infinity as it approaches them. The proposed calculated expression combined with the corresponding expressions for latitude can be used for testing the other dead reckoning algorithms implemented in the navigational equipment.

Keywords: vessel's geodetic longitude, dead reckoning formulas, Cauchy's problem, approximate solution, method error, upper bound.

For citation:

Deryabin, Victor V. "The assessment of the vessel's longitude dead reckoning method error." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 430–438. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-430-438.

УДК 656.61.052:527.61

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА СЧИСЛЕНИЯ ДОЛГОТЫ СУДНА

В. В. Дерябин

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

В работе получено выражение для верхней границы модуля погрешности метода счисления геодезической долготы судна, возникающей в результате упрощения уравнения счисления широты. Упрощение заключается в переходе от уравнения счисления широты, содержащего под знаком интеграла трансцендентную функцию, к уравнению, где указанная функция считается всегда равной ее значению при минимальной по модулю широте. Выведенная формула включает верхнюю границу модуля погрешности метода счисления широты, наибольшее значение модуля восточной составляющей абсолютной скорости в течение плавания, длительность плавания, наибольшее значение модуля широты в процессе плавания, а также параметры эллипсоида, по отношению к которому определяются счисляемые координаты. Выражение для верхней границы справедливо, когда при движении геодезическая высота судна остается постоянной. Оно не учитывает погрешности исходных данных, погрешности округления в навигационной электронной вычислительной машине, а также методические погрешности, связанные с интегрированием северной и восточной составляющих скорости, если они задаются таблично. Выполнены расчеты верхней границы модуля методической погрешности с использованием выведенного соотношения для различных скоростных режимов и длительностей плавания судна. Результаты расчетов согласуются с выводами, которые мож-

но сделать на основе выведенной формулы. Формула оценки погрешности долготы не работает в окрестности полюсов, так как оценка стремится к бесконечности по мере приближения к ним. Предлагаемое расчетное соотношение совместно с соответствующими выражениями для широты может использоваться для тестирования других алгоритмов счисления, реализованных в навигационной аппаратуре.

Ключевые слова: геодезическая долгота судна, формулы счисления, задача Коши, приближенное решение, погрешность метода, верхняя граница.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления долготы судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 430–438. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-430-438.

Введение (Introduction)

Система счисления пути судна характеризуется постепенной потерей точности по мере плавания. Причинами потери точности счисления являются ошибки исходных данных, погрешности округления чисел в навигационной ЭВМ, а также ошибки приближенных методов решения. Исследованию погрешностей счисления пути посвящено достаточно много работ. Например, в исследованиях [1]–[3] изучаются, как правило, ошибки счисления в рамках статистического подхода, основанного на сборе невязок в заданном районе плавания. В работе [4] рассматривается влияние погрешностей измерителей скорости на точность счислимого места судна. В исследовании [5] изучение процесса счисления смещено в сторону подводной навигации. В работе [6] предлагается алгоритм оценки точности счисления на основе нейронной сети. Общим для указанных исследований является то, что в них изучаются ошибки исходных данных. Другие погрешности (метода, округления чисел в ЭВМ) рассмотрены в значительно меньшей степени. Например, в малой степени изучено влияние погрешностей, возникающих при использовании тех или иных методов счисления.

Погрешность метода счисления может показаться, на первый взгляд, незначительной, однако современное состояние теории не позволяет, как правило, количественно точно (аналитически) оценить такую погрешность. Более того, будучи незначительной на небольших промежутках времени, при плавании в течение нескольких суток по счислению такая погрешность может уже оказывать существенное влияние на точность даже несмотря на ее относительно малый вклад в суммарную погрешность, в появлении которой преобладающую роль играют, естественно, ошибки исходных данных. Как правило, последний аргумент является объяснением небольшого интереса со стороны исследователей к вопросам ошибок метода. Изучение погрешностей метода счисления необходимо также потому, что влияние ошибок происходит в общем случае совместно.

Метод счисления определяется во многом моделью используемой земной поверхности. Как правило, в качестве такой поверхности используется либо сфера, либо эллипсоид вращения (как это предложено, например, в работах [7], [8]). Особое значение изучение погрешностей метода имеет в том случае, когда требуется получить гарантированные интервальные оценки счислимых координат места судна. При выборе эллипсоида вращения в качестве геометрической модели счисления получается система дифференциальных уравнений. Решить данную систему точными методами невозможно, так как в левой части уравнения широты (как уравнения с разделяющимися переменными) имеется функция широты, первообразная которой не выражается через ее элементарные функции. Более того, в правой части уравнения северная составляющая абсолютной скорости не имеет вообще аналитического описания, а задается в виде последовательности, полученной по результатам дискретных измерений (т. е. таблично). Остается только вариант использования приближенных методов. Последние, в свою очередь, могут быть в своей основе либо численными, либо аналитическими.

Численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений представлены двумя основными группами. К первой группе относятся методы Рунге – Кутты [9], [10]. Для оценки погрешностей данных методов необходимо знание производных искомой функции, начиная со второго порядка и выше. Точное значение оценок данных производных получить невоз-

можно (или они будут очень завышенными), поскольку искомая функция не задается аналитически. Пределы указанных производных могут быть оценены лишь на основе того или иного способа, степень адекватности которого невозможно установить. Даже для оценки погрешности простейшего метода Эйлера требуется оценить верхнюю границу модуля северной координаты вектора ускорения судна, что не так просто сделать, как для одноименной составляющей скорости. Оценить границы производных скорости более высокого порядка еще труднее. Вторую группу составляют разностные методы (формулы Адамса более употребительны). В их основе находится замена производной искомой функции некоторой интерполирующей функцией, которая выражается через элементарные функции и поэтому интегрируется точно. Действительный вид заменяемой функции неизвестен. Оценить степень ее отклонения от интерполирующей функции можно по значениям производных от заменяемой функции. Такие производные можно оценить лишь приближенно. Таким образом, основная проблема использования численных методов для интегрирования широтного уравнения счисления состоит в том, что точно оценить погрешность метода невозможно, так как нельзя точно определить промежутки возможных значений северной составляющей ускорения и ее производных.

В статье [11] предложен вариант приближенного аналитического решения широтного уравнения счисления, заключающегося в замене в правой части этого уравнения (для задачи Коши) трансцендентной функции постоянной, сохраняющей свое значение на промежутке времени плавания. Также была выведена формула, позволяющая определить верхнюю границу модуля ошибки, происходящей от такой замены. В настоящем исследовании изучается вопрос определения верхней границы модуля погрешности долготы судна, возникающей в результате указанной выше замены в уравнении широты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Математическая формулировка задачи. Как отмечалось в статье [11], дифференциальные уравнения счисления координат судна, движущегося вдоль поверхности эллипсоида, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} V_N(t); \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{1}{a+h} \frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi} V_E(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где φ, λ — геодезическая широта и долгота центра тяжести судна соответственно; $V_N(t)$ и $V_E(t)$ — северная и восточная составляющие скорости судна относительно грунта, зависящие от времени t ; a — большая полуось эллипсоида, e — эксцентриситет меридиана, h — геодезическая высота центра тяжести судна, не зависящая от времени.

Уравнение счисления для широты φ не имеет точного решения, даже если функция $V_N(t)$ задается аналитически, так как выражение $\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3}$ не имеет первообразной, представляемой в аналитическом виде. В статье [11] предлагается перейти от решения исходной задачи — точного решения первого уравнения в (1) — к решению другой задачи:

$$\frac{d\tilde{\varphi}}{dt} = \frac{q_{\max}}{(a+h)(1-e^2)} V_N(t), \quad (2)$$

где $q_{\max} = \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3}$; $\tilde{\varphi}$ — приближенное значение широты.

Абсолютная погрешность метода α_φ оценивается по формуле

$$|\alpha_\varphi| \leq \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \left(\sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3} - \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\max|\varphi|))^3} \right) \cdot \max |V_N(t)| \cdot t. \quad (3)$$

Наибольшие и наименьшие значения в формулах (2) и (3) берутся за время плавания судна по счислению.

Уравнение счисления для долготы λ в соотношениях (1) содержит в правой части множитель $\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi} / \cos \varphi$, зависящий от широты φ , вычисляемой по формуле (2) и имеющей ошибку

метода этой формулы α_φ . Иными словами, исходное долготное уравнение счисления заменяется уравнением, содержащим приближенное значение широты $\tilde{\varphi}$, вычисленное на основе решения уравнения (2):

$$\frac{d\tilde{\lambda}}{dt} = \frac{1}{a+h} \frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}}{\cos \tilde{\varphi}} V_E(t), \quad (4)$$

где $\tilde{\lambda}$ — приближенное значение долготы судна.

Найдем теперь одну из верхних границ модуля погрешности метода счисления долготы α_λ , возникающую вследствие перехода от исходного уравнения к уравнению (4).

Решение задачи. Перепишем данное соотношение в интегральном виде:

$$\tilde{\lambda}(t) = \lambda(0) + \frac{1}{a+h} \int_0^t \left[\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}}{\cos \tilde{\varphi}} \right] V_E(t) dt. \quad (5)$$

Второе соотношение в (1) запишем в аналогичном виде:

$$\lambda(t) = \lambda(0) + \frac{1}{a+h} \int_0^t \left[\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi} \right] V_E(t) dt. \quad (6)$$

Вычитая выражение (5) из выражения (6), получим ошибку метода α_λ :

$$\alpha_\lambda = \frac{1}{a+h} \int_0^t \left[\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}}}{\cos \tilde{\varphi}} - \frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi} \right] V_E(t) dt. \quad (7)$$

Введем обозначения: $f_\varphi := \sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi} / \cos \varphi$ и $\tilde{f}_\varphi := \sqrt{1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}} / \cos \tilde{\varphi}$, с учетом которых соотношение (7) запишется в следующем виде:

$$\alpha_\lambda = \frac{1}{a+h} \int_0^t (\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t) dt.$$

Выражение для модуля α_λ имеет вид:

$$|\alpha_\lambda| = \frac{1}{a+h} \left| \int_0^t (\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t) dt \right|. \quad (8)$$

Как известно из курса анализа,

$$\left| \int_0^t (\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t) dt \right| \leq \int_0^t |(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t)| dt \leq Ct, \quad (9)$$

где C — константа, удовлетворяющая условию $|(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t)| \leq C$ для любого момента времени t .

Найдем сначала границы области неопределенности множителя $\tilde{f}_\varphi - f_\varphi$. Функция $f_\varphi = \sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi} / \cos \varphi$ имеет наименьшее значение (единица) при широте $\varphi = 0$. В промежутках от 0 до $\pm 90^\circ$ функция монотонно возрастает, устремляясь к бесконечности по мере приближения к полюсам. Более того, функция f_φ является четной. График данной функции для диапазона широт от $85^\circ S$ до $85^\circ N$ имеет следующий вид:

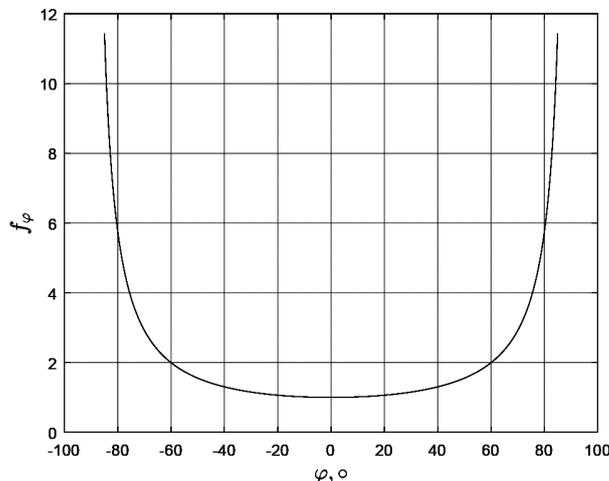


График зависимости величины f_φ от широты

Данный график помогает наглядно понять два случая, возникающих при оценке значений функции f_φ и подынтегрального выражения $\tilde{f}_\varphi - f_\varphi$ правой части (7). Случаи связаны с тем, что возможны два варианта расположения границ промежутка неопределенности широты $[\tilde{\varphi} - A_\varphi; \tilde{\varphi} + A_\varphi]$, где A_φ — верхняя граница модуля абсолютной погрешности метода счисления широты, равная правой части неравенства (3).

Первый случай наблюдается, когда границы промежутка неопределенности широты лежат по одну сторону от оси ординат (оси симметрии), включая саму ось. Иными словами, $\tilde{\varphi} - A_\varphi < \tilde{\varphi} + A_\varphi \leq 0$ или $0 \leq \tilde{\varphi} - A_\varphi < \tilde{\varphi} + A_\varphi$ или $(\tilde{\varphi} - A_\varphi) \cdot (\tilde{\varphi} + A_\varphi) \geq 0$.

Второй случай возникает, когда границы промежутка неопределенности широты лежат по разные стороны от оси ординат и имеют разные знаки, т. е. $\tilde{\varphi} - A_\varphi < 0$ и $\tilde{\varphi} + A_\varphi > 0$ или, что эквивалентно, $(\tilde{\varphi} - A_\varphi) \cdot (\tilde{\varphi} + A_\varphi) < 0$.

Для первого случая границы промежутка неопределенности функции f_φ определяются следующим неравенством:

$$\min[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \leq f_\varphi \leq \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)].$$

Выражение $\tilde{f}_\varphi - f_\varphi$ будет иметь следующую интервальную оценку:

$$\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \leq \tilde{f}_\varphi - f_\varphi \leq \tilde{f}_\varphi - \min[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)],$$

а его абсолютная величина

$$|\tilde{f}_\varphi - f_\varphi| \leq \max\left[|\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|, |\tilde{f}_\varphi - \min[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|\right].$$

Можно показать, что функция f_φ на интервале $(-90^\circ; 90^\circ)$ имеет положительную вторую производную. Это означает, что для любой пары промежутков $[\tilde{\varphi} - A_\varphi; \tilde{\varphi}]$ и $[\tilde{\varphi}; \tilde{\varphi} + A_\varphi]$, принадлежащей указанному ранее интервалу на одной полуоси, справедливо следующее утверждение: «Наименьший модуль производной $|df_\varphi / d\varphi|$ на одном из них больше чем наибольший на другом». Длина обоих промежутков (с закрытыми границами) одинакова и составляет A_φ . В соответствии с теоремой Лагранжа (о конечных приращениях), приращение функции на отрезке есть произведение его длины на производную в точке, принадлежащей отрезку, исключая его границы. Таким образом, на отрезке, где функция имеет большую (по модулю) производную, будет и большее (по модулю) приращение функции. В соответствии с этими рассуждениями можно сделать вывод о том, что $|\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]| > |\tilde{f}_\varphi - \min[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|$. Следовательно, переходим к следующему неравенству:

$$|\tilde{f}_\varphi - f_\varphi| \leq |\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|.$$

Умножая данное неравенство на величину $|V_E(t)|$, а также принимая во внимание, что $|\tilde{f}_\varphi - f_\varphi| \cdot |V_E(t)| = |(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi)V_E(t)|$, получим:

$$|(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi)V_E(t)| \leq |V_E(t)| \cdot |\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|;$$

$$|(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi)V_E(t)| \leq \max|V_E(t)| \cdot |\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|,$$

где $\max|V_E(t)|$ — наибольшее значение модуля восточной составляющей скорости судна на промежутке времени $[0; t]$.

Для второго случая имеют место неравенства:

$$1 \leq f_\varphi \leq \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)];$$

$$\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \leq \tilde{f}_\varphi - f_\varphi \leq \tilde{f}_\varphi - 1;$$

$$|\tilde{f}_\varphi - f_\varphi| \leq \max\left[|\tilde{f}_\varphi - \max[f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)]|, \tilde{f}_\varphi - 1\right].$$

Второй случай предполагает, что приближенное значение широты $\tilde{\varphi}$ может быть равно или не равно нулю. Для второго варианта получается, что $\tilde{\varphi}$ и $(\tilde{\varphi} - A_\varphi)$ или $(\tilde{\varphi} + A_\varphi)$ лежат на одной полуоси ($\tilde{\varphi} < 0$ или $\tilde{\varphi} > 0$), т. е. либо интервал $[\tilde{\varphi} - A_\varphi; \tilde{\varphi}] \cup (\tilde{\varphi}; 0]$, либо интервал $[0; \tilde{\varphi}] \cup (\tilde{\varphi}; \tilde{\varphi} + A_\varphi]$

принадлежит одной полуоси. На основе теоремы Лагранжа (о конечных приращениях) можно записать:

$$\begin{aligned} & \left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right| = A_\varphi \cdot |f'_\varphi(\varphi_1)|; \\ & \tilde{f}_\varphi - 1 = \begin{cases} \tilde{\varphi} \cdot |f'_\varphi(\varphi_{II})|, & \text{если } \tilde{\varphi} > 0; \\ -\tilde{\varphi} \cdot |f'_\varphi(\varphi_{II})|, & \text{если } \tilde{\varphi} < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

где φ_1 обозначает некоторую точку из промежутка $(\tilde{\varphi} - A_\varphi; \tilde{\varphi})$ или $(\tilde{\varphi}; \tilde{\varphi} + A_\varphi)$, φ_{II} — точку из промежутка $(\tilde{\varphi}; 0)$ или $(0; \tilde{\varphi})$.

Как отмечалось ранее, вторая производная функции f_φ положительна на всем рабочем диапазоне широт, кроме окрестностей полюсов. f' — нечетная функция (будет показано далее). Следовательно, $|df_\varphi / d\varphi|$ монотонно убывает при движении от полюсов к экватору. Это означает, что для двух непересекающихся промежутков модуль первой производной будет больше в любой точке промежутка, находящегося ближе к полюсу, чем в любой точке промежутка, находящегося ближе к экватору. Иными словами, $|f'_\varphi(\varphi_1)| > |f'_\varphi(\varphi_{II})|$. На основе соотношений (10) можно сделать вывод о том, что $\left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right| > \tilde{f}_\varphi - 1$, если $\tilde{\varphi} \leq A_\varphi$ или $-\tilde{\varphi} \leq A_\varphi$. Последние два неравенства выполняются, так как второй случай предполагает выполнение $(\tilde{\varphi} - A_\varphi) \cdot (\tilde{\varphi} + A_\varphi) < 0$ или (что то же самое) $\tilde{\varphi}^2 < A_\varphi^2$. Анализируя график квадратичной функции, приходим к выводу, что последнее неравенство означает выполнение следующих неравенств: $\tilde{\varphi} < A_\varphi$ или $-\tilde{\varphi} < A_\varphi$.

Если $\tilde{\varphi} = 0$, то неравенство $\left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right| > \tilde{f}_\varphi(0) - 1 = 0$ также выполняется.

Таким образом, получаем следующее неравенство:

$$\left| \tilde{f}_\varphi - f_\varphi \right| \leq \left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right|.$$

Продолжая цепочку рассуждений по аналогии с первым случаем, получаем неравенства:

$$\begin{aligned} & \left| (\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t) \right| \leq |V_E(t)| \cdot \left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right|; \\ & \left| (\tilde{f}_\varphi - f_\varphi) V_E(t) \right| \leq \max |V_E(t)| \cdot \left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right|. \end{aligned}$$

Как видно, для обоих случаев результат получился один и тот же. Выражение, стоящее в правой части данного неравенства, хоть и ограничивает модуль подынтегральной функции, однако не может играть роль константы C в соотношении (9). Причина заключается в том, что величина $\left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right|$ зависит от времени на промежутке $[0; t]$. Возникает задача поиска верхней границы данной величины. В соответствии с теоремой Лагранжа (о конечных приращениях) запишем

$$\left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right| = A_\varphi \cdot |f'_\varphi(\varphi_*)|,$$

где φ_* — некоторая точка из промежутка $[\tilde{\varphi} - A_\varphi; \tilde{\varphi}]$ или $[\tilde{\varphi}; \tilde{\varphi} + A_\varphi]$.

Производная функции f_φ определяется следующим выражением:

$$f'_\varphi = \frac{(1 - e^2) \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \cdot \cos^2 \varphi}.$$

Для абсолютной величины будут справедливы соотношения:

$$|f'_\varphi| = \frac{(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \cdot \cos^2 \varphi} \cdot |\sin \varphi| \leq \frac{(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|)} \cdot \cos^2 (\max |\varphi|)} \cdot \sin (\max |\varphi|),$$

где $\max |\varphi| < 90^\circ$ — наибольшее значение модуля широты судна на промежутке времени плавания $[0; t]$.

Получается, что

$$\left| \tilde{f}_\varphi - \max [f_\varphi(\tilde{\varphi} - A_\varphi), f_\varphi(\tilde{\varphi} + A_\varphi)] \right| \leq A_\varphi \cdot \frac{(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|)} \cdot \cos^2 (\max |\varphi|)} \cdot \sin (\max |\varphi|).$$

Окончательная оценка для модуля подынтегрального выражения имеет вид:

$$|(\tilde{f}_\varphi - f_\varphi)V_E(t)| \leq \max |V_E(t)| \cdot A_\varphi \frac{(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(\max|\varphi|)} \cdot \cos^2(\max|\varphi|)} \cdot \sin(\max|\varphi|).$$

Таким образом, константа C в выражении (9) найдена.

Результаты (Results)

Продолжая рассуждения на основе соотношений (8) и (9), получим верхнюю границу A_λ модуля абсолютной погрешности метода $|\alpha_\lambda|$, возникающей вследствие предположения (сделанного на этапе расчета широты) о том, что $\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv \sqrt{(1-e^2 \sin^2(\min|\varphi|))^3}$:

$$|\alpha_\lambda| \leq A_\lambda = A_\varphi \cdot \frac{(1-e^2)}{a+h} \cdot \frac{\sin(\max|\varphi|)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(\max|\varphi|)} \cdot \cos^2(\max|\varphi|)} \cdot \max |V_E(t)| \cdot t, \quad (11)$$

где $\max|\varphi| < 90^\circ$; A_φ — верхняя граница модуля абсолютной погрешности метода счисления широты судна $|\alpha_\varphi|$, определяемая в соответствии с выражением (3).

Выполним расчеты по формуле (11) для судов, имеющих различную наибольшую скорость хода, которые движутся на поверхности эллипсоида WGS-84 ($a = 6378137$ м, $e^2 = 2a - a^2 = 2(1/298,257223563) - (1/298,257223563)^2 \approx 0,006694379990141$) в течение периода плавания различной продолжительности. Предполагается, что движение происходит на поверхности эллипсоида ($h = 0$), $\min|\varphi| = 0$, $\max|\varphi| = 85^\circ$, $\max |V_N(t)| = \max |V_E(t)|$. Расчеты выполнены с использованием среды MATLAB R2015b на 64-битовой операционной системе. Результаты сведены в следующую таблицу:

Верхняя граница модуля методической ошибки определения долготы судна A_λ (в угловых минутах (') или градусах (°))

Тип судна	Наибольшая скорость $\max V_E(t) $, уз	Время плавания, ч, сут					
		1 ч	4 ч	1 сут	7 сут	14 сут	28 сут
Суда, занятые буксировкой и другими подобными работами	10	0,04'	0,6'	21,9'	17,8°	71,4°	285,6°
Сухогрузы универсальные	15	0,1'	1,4'	49,2'	40,2°	160,6°	> 360°
Контейнеровозы, паромы, пассажирские суда	25	0,2'	3,8'	2,3°	111,6°	> 360°	> 360°
Атомные крейсера	35	0,5'	7,4'	4,5°	218,6°	> 360°	> 360°
Суда на воздушной подушке	60	1,4'	21,9'	13,1°	> 360°	> 360°	> 360°
Экранопланы	300	34,1'	9,1°	327,8°	> 360°	> 360°	> 360°

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Расчеты показали, что, следуя на универсальном сухогрузе вдоль меридиана со скоростью 15 уз в течение четырехчасовой вахты, можно получить погрешность в определении долготы, не превосходящую по абсолютному значению 1,4', если в выражениях (3) и (11) примем $\min|\varphi| = 0^\circ$, $\max|\varphi| = 85^\circ$. В отличие от формулы (3), где диапазон широт ничем не ограничен, формула оценки погрешности долготы требует, чтобы $\max|\varphi| < 90^\circ$. При этом, конечно, нет возможности точно указать, какую наибольшую по модулю широту можно брать. Теоретическое решение данного вопроса возможно, очевидно, с учетом информации об ошибках округления в ЭВМ. На практике можно исходить либо из района плавания судна, либо из приемлемости полученной верхней границы погрешности. Например, если для скорости 25 уз оценивать погрешность при $\max|\varphi| = 85^\circ$, то ошибка не превосходит 0,2' за 1 ч (см. таблицу). Установка $\max|\varphi| = 89^\circ$ приводит к оценке погрешности, равной 6' за час.

Формулы (3) и (11) можно использовать в указанной далее последовательности. Сначала с использованием формулы (3) и соотношения, приведенного в [11] определить диапазон широт, в ко-

тором происходит плавание судна, и верхнюю границу диапазона $\max |\varphi|$ уже использовать в формуле (11). При этом, конечно, предполагается, что производная широты по времени (или, что то же самое, северная составляющая абсолютной скорости) не меняет свой знак в течение плавания. Примером такого плавания может служить движение судна постоянными курсом и скоростью при постоянных ветре и течении.

На основе формулы (11) можно сделать интересный вывод: если подставить в формулу правую часть соотношения (3), видно, что погрешность метода определения долготы зависит от времени как квадратичная функция. При этом коэффициент при квадрате времени определяется параметрами эллипсоида, на котором происходит счисление пути, а также ограничениями по широте района плавания и по максимальной скорости движения. Погрешность метода широты (в соответствии с соотношением (3)) зависит от времени линейно. Получается, что погрешность широты, линейно зависящая от времени, порождает погрешность долготы, зависящую уже от квадрата времени.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования получено приближенное решение дифференциального уравнения счисления геодезической долготы судна, движущегося на постоянной высоте над поверхностью общеземного эллипсоида, а также верхняя граница модуля погрешности метода такого решения. Погрешность возникает вследствие замены широты в правой части уравнения приближенным значением, которое, в свою очередь, получается также в результате приближенного решения соответствующего уравнения широты. Выполнены расчеты верхней границы модуля погрешности приближенного решения. При расчетах использовались различные значения максимального модуля восточной составляющей скорости судна для различной длительности плавания с использованием параметров эллипсоида WGS-84.

Важным свойством предлагаемого метода приближенного решения уравнения долготы является возможность получения оценки погрешности такого метода. Причем для расчета верхней границы модуля погрешности не требуется знаний о предельных значениях ускорения судна, производной ускорения и других подобных трудно поддающихся интервальной оценке величин. Единственный кинематический параметр, который используется для расчета, это наибольшее значение модуля восточной составляющей абсолютной скорости судна на промежутке времени плавания.

Формула, выведенная для оценки погрешности метода счисления долготы, использует верхнюю границу модуля погрешности метода счисления широты, формула для вычисления которой была получена ранее. Это позволяет утверждать о возможности оценки точности предлагаемого метода счисления координат судна (или другого объекта), движущегося на поверхности эллипсоида (точнее, с постоянной высотой над его поверхностью). Однако пока оценки даются на основе вычислений, выполненных по формулам, точность которых (вычислений) не оценивается никаким образом. Указанное обстоятельство в настоящее время сильно ограничивает возможности практической реализации предложенных алгоритмов. Поэтому дальнейшие усилия должны сосредоточиться на разработке методов гарантированных интервальных оценок погрешностей округления, возникающих в ходе расчетов на ЭВМ ошибок метода по предложенным формулам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Б. Н.* Анализ свойств показателей точности счисления пути и некоторые практические выводы / Б. Н. Беляев // Записки по гидрографии. — 1996. — № 230. — С. 20–28.
2. *Михальский В. А.* К вопросу о решении задачи оценивания точности счисления / В. А. Михальский // Пятая российская научно-техническая конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004)». — СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2004. — С. 77–81.
3. *Михальский В. А.* Метрология в кораблевождении и решение задач навигации / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
4. *Карасев В.В.* Обоснование требований к повышению точности измерения скорости корабля и точности счисления / В. В. Карасев, С. А. Верещагин, В. Н. Коломоец // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2009. — № 21. — С. 91–97.

5. Болховитинов В. К. Счисляемое местоположение подводного робота / В. К. Болховитинов // Системы управления и обработки информации. — 2015. — № 30. — С. 26–37.
6. Дерябин В. В. Оценка точности нейросетевой системы счисления пути судна / В. В. Дерябин // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 4 (59). — С. 40–43.
7. Каврайский А. В. Алгоритмы точного решения прямой и обратной навигационных задач / В. А. Каврайский // Навигация и гидрография. — 2002. — № 14. — С. 126–136.
8. Пантелеев Н. Ф. Счисление геодезических координат B, L, h для объектов, движущихся по поверхности Земли / Н. Ф. Пантелеев, В. В. Кузнецов, А. Г. Глазков, А. А. Власова // Труды ФГУП «НППЦАП». Системы и приборы управления. — 2010. — № 1. — С. 69–72.
9. Banachowicz A. A comparison of numerical solutions of dead reckoning navigation/ A. Banachowicz, A. Wolski // Reports on Geodesy. — 2012. — Vol. 2/93. — Pp. 49–55.
10. Wensveen P. J. A path reconstruction method integrating dead-reckoning and position fixes applied to humpback whales / P. J. Wensveen, L. Thomas, P. J. O. Miller // Movement ecology. — 2015. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 31. DOI: 10.1186/s40462-015-0061-6.
11. Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления широты судна / В. В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.

REFERENCES

1. Belyaev, B.N. “Analiz svoystv pokazately tochnosti schisleniya put i nekotorye prakticheskie vivody.” *Zapiski po gidrographii* 230 (1996): 20–28.
2. Mikhalskiy, V. A. “K voprosu o reshenii zadachi otsenivaniya tochnosti schisleniya.” *Pyataya rossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii (NO-2004)»*. SPb.: GNINGI MO RF, 2004. 77–81.
3. Mikhalskiy, V. A., and V. A. Katenin. *Metrologiya v korablevozhdenii i reshenie zadach navigatsii*. SPb.: Elmor, 2009.
4. Karasev, V. V., S. A. Vereschagin, and V. N. Kolomoets. “Obosnovanie trebovaniy k povysheniyu tochnosti izmereniya skorosti korablya i tochnosti schisleniya.” *Nauchnye trudy dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 21 (2009): 91–97.
5. Bolkhovitinov, V. K. “Schislyаемое mestopolozhenie podvodnogo robota.” *Control and information processing systems* 30 (2015): 26–37.
6. Deryabin, V. V. “Precision assessment of neural network-based vessel’s dead reckoning system.” *Transport of the Russian Federation* 4(59) (2015): 40–43.
7. Kavraiskiy, A. V. “Algorithms for Precise Solution of the Direct and Inverse Navigation Problems.” *Navigation and hydrography* 14 (2002): 126–136.
8. Panteleev, N. F. “Schislenie geodezicheskikh koordinat B, L, h dlya ob»ektov, dvizhushchikhsya po poverkhnosti Zemli.” *Trudy FGUP NPTsAP. Sistemy i pribory upravleniya* 1 (2010): 69–72.
9. Banachowicz, Andrzej, and Adam Wolski. “A comparison of numerical solutions of dead reckoning navigation.” *Reports on Geodesy* 2/93 (2012): 49–55.
10. Wensveen, Paul J., Len Thomas, and Patrick JO Miller. “A path reconstruction method integrating dead-reckoning and position fixes applied to humpback whales.” *Movement ecology* 3.1 (2015): 31. DOI: 10.1186/s40462-015-0061-6.
11. Deryabin, Victor V. “Assessment of a method error of dead reckoning of a vessel’s latitude.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gmavitder@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gmavitder@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2019 г.

Received: April 23, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-439-447

STUDY OF THE STRUCTURE OF COEFFICIENT TAKING ACCOUNT THE HUMAN FACTOR UNDER THE NAVIGATION ACCIDENTS

E. P. Burakovskiy, P. E. Burakovskiy

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

The human factor, which one of the main causes of navigation accidents, is investigated. The existing approaches to accounting the influence of the human factor on the navigation safety are analyzed in the paper. The author's approach to the accounting the human factor in the vessels collision is presented. The structure of the coefficient taking into account the human factor, which allows us to estimate its fluctuations during the day, to determine the optimal duration of the voyage and to choose the standard probability of navigation accidents, is proposed. It is assumed that the daily fluctuations of the coefficient taking into account the human factor (skipper vigilance) are described by the sinusoidal law, and during the voyage this coefficient falls exponentially. Using the developed in the research process new mathematical model, the collision probability at the vessel movement in an arbitrary flow of other vessels forming the Poisson field with different intensity taking account the human factor influence has been estimated. This approach allows not only to determine the normative probability of vessels collision, but also to regulate it by tightening the requirements for the coefficient taking account the human factor. The obtained values of the collision probability are in good agreement with the statistical data and results received by the other authors, which indicates the adequacy of the proposed approach to the accounting the human factor influence at assessing the risk of the vessels collision. It has been shown that to minimize the probability of vessels collision, the level of permissible coefficients taking account the human factor has to be in the range of 0.95–1.0. The significant influence of daily fluctuations of the coefficient taking into account the human factor on the probability of vessels collision is proved. A distinctive feature of this work is not a separate consideration of the problem of determining the coefficient that takes into account the human factor, but its direct connection with the probability of a navigation accident, the regulatory probability, the navigation intensity, which allows us to solve a wide range of problems related to the navigation safety providing.

Keywords: navigation safety, vessels collision, human factor, probability, mathematical model, uncontrollable model, vigilance, time of voyage, daily fluctuations, normative probability.

For citation:

Burakovskiy, Evgeny P., and Pavel E. Burakovskiy. "Study of the structure of coefficient taking account the human factor under the navigation accidents." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 439–447. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-439-447.

УДК 656.61.052

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОЭФФИЦИЕНТА, УЧИТЫВАЮЩЕГО ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР ПРИ НАВИГАЦИОННЫХ АВАРИЯХ

Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Российская Федерация

Исследована одна из основных причин навигационных аварий — человеческий фактор. Выполнен анализ существующих подходов к учету влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания. Представлен авторский подход к учету человеческого фактора при столкновении судов. Предложена структура коэффициента, учитывающего человеческий фактор, которая позволяет оценивать его колебания в течение суток, определять оптимальную продолжительность рейса и выбирать нормативную вероятность навигационных аварий. Принимается, что суточные колебания коэффициента, учитывающего человеческий фактор (бдительность судоводителя), описываются синусоидальным законом, а в течение рейса этот коэффициент падает по экспоненциальному закону. С использованием новой, разработанной в процессе исследования математической модели, выполнена оценка вероятности столкновения при движении судна в произвольном потоке прочих судов, образующих пуассоновское поле с различной

интенсивностью с учетом влияния человеческого фактора. Данный подход позволяет не только определить нормативную вероятность столкновения судов, но и регулировать ее путем ужесточения требований к коэффициенту, учитывающему человеческий фактор. Полученные значения вероятности столкновения хорошо согласуются со статистическими данными и результатами, полученными другими авторами, что свидетельствует об адекватности предлагаемого подхода к учету влияния человеческого фактора при оценке риска столкновения судов. Показано, что для минимизации вероятности столкновения судов уровень допустимых коэффициентов, учитывающих человеческий фактор, должен находиться в диапазоне 0,95–1,0. Доказано существенное влияние суточных колебаний коэффициента, учитывающего человеческий фактор, на вероятность столкновения судов. Отличительной особенностью настоящей работы является не отдельное рассмотрение проблемы определения коэффициента, учитывающего человеческий фактор, а непосредственная связь его с вероятностью возникновения навигационной аварии, нормативной вероятностью, интенсивностью судоходства, что позволяет решать широкий круг задач, связанных с обеспечением безопасности мореплавания.

Ключевые слова: безопасность мореплавания, столкновения судов, человеческий фактор, вероятность, математическая модель, неуправляемая модель, бдительность, время рейса, суточные колебания, нормативная вероятность.

Для цитирования:

Бураковский Е. П. Изучение структуры коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 439–447. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-439-447.

Введение

Известно, что основной причиной навигационных аварий является так называемый *человеческий фактор* [1]. Поэтому многие отечественные и зарубежные ученые занимались исследованием этого вопроса. Здесь следует отметить прежде всего специалистов, внесших наибольший вклад в решение этой проблемы, таких как В. В. Вейхман [1] и Ф. М. Кацман [2], которые проанализировали практически все аспекты человеческого фактора в судовождении. Проблеме нормирования при обеспечении безопасной эксплуатации судов посвящены работы В. Д. Клименко [3]. Исследованием природы человеческих ошибок занимался М. А. Котик [4], исследованием учета человеческого фактора при оценке безопасности мореплавания занимались М. Л. Маринов [5] и В. А. Туркин [6]. Аналитические модели для оценки риска навигационных аварий предложены М. Celik, S. Cebi [7], С. Macrae [8], М. R. Martins, М. С. Maturana [9]. Исследованию роли человеческого фактора в авариях на море посвящены работы W. O’Neil [10], Y. Zhang, Y. Zhan, Q. Tan [11] и др. Значительный вклад в решение проблемы оценки риска навигационных аварий и снижения их последствий внес Р. Т. Pedersen [12]. Этими и другими авторами были проанализированы различные аспекты, оказывающие влияние на человеческий фактор, такие как психофизиологические и психологические, анатомические и физиологические особенности человека, а также усталость, компетентность, языковые проблемы, образование, конфликтность в экипаже, отрицательные черты отдельных его членов, недисциплинированность, невежество, общее состояние здоровья, стрессоустойчивость, бытовая устроенность, мотивация, отношение к алкоголю и т. д.

Попытка учесть как можно большее количество факторов (до 30 и более) совершенно разнородных, изменяющихся не только в течение рейса, но и в течение одних суток и даже одной вахты с неизвестными корреляционными связями между собой, конечно, не может привести к надежным результатам в численной оценке человеческого фактора. В этом случае необходимо ограничиться минимальным количеством главных (доминирующих) факторов и проанализировав закономерности их изменения, сделать вывод о степени влияния человеческого фактора. В конечном счете, интерес представляет бдительность судоводителя и быстрота принятия им решений в различных ситуациях.

В этом отношении наиболее интересна методика оценки человеческого фактора, предложенная Н. В. Митрофановой [13], в основе которой лежит пятибалльная экспертная оценка личностных характеристик члена экипажа. Для этой цели в качестве основных рискообразующих харак-

теристик моряка автор предлагает использовать такие, как профессионализм, ответственность, внимательность, конфликтность, реакция, отношение к алкоголю. На основе экспертного метода автором выполнена оценка каждого из этих качеств. Для определения уровня риска полученное значение показателя личностной характеристики оценивается с помощью табл. 1.

Таблица 1

Оценка риска с учетом качественных и количественных характеристик моряка

Качественная характеристика	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Количественная характеристика	0–0,5	0,51–0,75	0,76–0,84	0,85–1
Уровень риска	Критический	Максимальный	Средний	Минимальный

При этом необходимо заметить, что хотя методика создавалась для учета человеческого фактора при страховании судов, она, несмотря на резкое ограничение количества учитываемых факторов, позволяет получать достаточно приемлемые результаты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим пример расчета вероятности столкновения судов с учетом человеческого фактора. В первом приближении он может быть выполнен путем умножения вероятности столкновения судов для случая неуправляемого их движения на два коэффициента, учитывающих человеческий фактор, так как в столкновении участвуют, как правило, два судна. Таким образом, можно записать следующее выражение:

$$P_{\text{столкн}} = P_{\text{неуправл}} \cdot [1 - K_{\phi 1}] \cdot [1 - K_{\phi 2}], \quad (1)$$

где $P_{\text{столкн}}$ — вероятность столкновения судов с учетом человеческого фактора;

$P_{\text{неуправл}}$ — вероятность столкновения в неуправляемой модели;

$K_{\phi i}$ — некоторый коэффициент (см. табл. 1), учитывающий человеческий фактор («бдительность» человека, несущего вахту).

Ясно, что коэффициент $K_{\phi i}$ изменяется в пределах $K_{\phi i} = 0 \dots 1$. При нахождении человека в нормальном состоянии коэффициент $K_{\phi i}$ будет близок к единице, в противном случае он всегда будет меньше единицы. Конечно, для уточнения значений этого коэффициента можно провести представительное тестирование штурманского состава на всех вахтах в течение суток. Все остальные факторы (туман, сильное волнение и т. д.) могут быть также учтены путем дополнительной корректировки значений $K_{\phi i}$. Вообще вместо коэффициента $K_{\phi i}$ в формуле (1) может быть некоторая функция состояния человека, которая должна также изменяться в пределах от нуля до единицы.

Однако само по себе получение численных значений коэффициентов (см. табл. 1) не позволяет оценивать вероятности навигационных аварий не только в течение рейса, но и в течение суток, так как этот коэффициент также претерпевает изменения. В этой связи предлагается следующий подход. Введем в рассмотрение при оценке человеческого фактора два положения.

Первое — будем полагать, что бдительность вахтенных штурманов характеризуется коэффициентом, учитывающим человеческий фактор, падающим по экспоненциальному закону в зависимости от длительности рейса, а именно $e^{-\lambda t}$, где λ — параметр, характеризующий скорость убывания коэффициента, учитывающего человеческий фактор, в течение рейса; t — время рейса.

Второе — будем считать, что суточные биоритмы человека, изменяющие коэффициент $K_{\phi i}$, учитывающий человеческий фактор, будут определяться синусоидальным законом, а именно

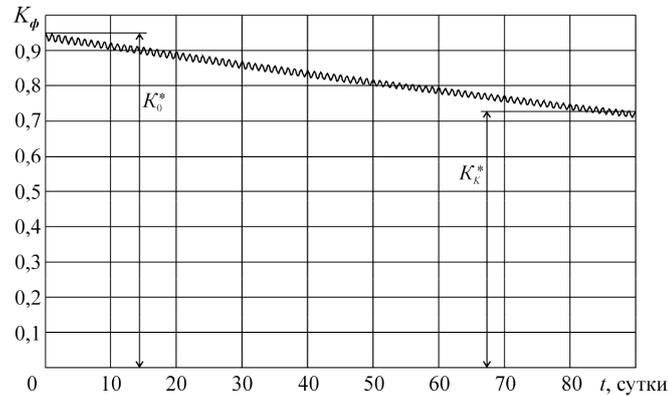
$\sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \frac{\pi}{2}\right)$. Таким образом, общее уравнение, характеризующее изменение коэффициента, учитывающего человеческий фактор (рис. 1), будет иметь следующий вид:

$$K_D = \frac{K_0^*}{1+A} \cdot \left[1 + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \frac{\pi}{2}\right) \right] \cdot e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Результаты (Results)

На рис. 1, а показаны значения коэффициента, учитывающего человеческий фактор на начало рейса K_0^* (см. табл. 1) и на конец рейса K_k^* . Нормируя минимально возможный уровень значения человеческого фактора на конец рейса K_k^* , можно устанавливать научно обоснованную продолжительность рейса.

а)



б)

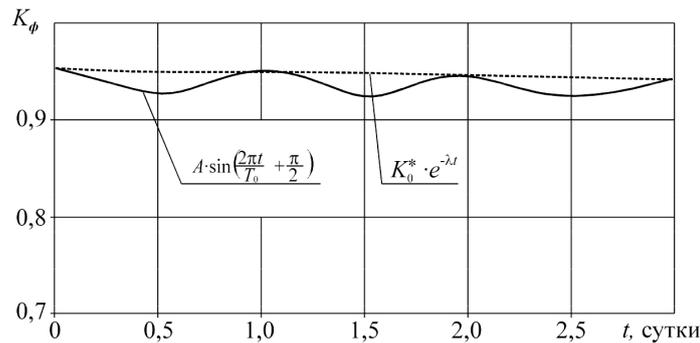


Рис. 1. Изменение коэффициента:
а — в течение рейса; б — в течение трех суток

На рис. 1, б представлен график, аналогичный приведенному на рис. 1, а, за исключением периода изменения коэффициента, ограниченного тремя сутками. Видны колебания коэффициента, учитывающего человеческий фактор, обусловленные суточными биоритмами. В данном случае важным является вопрос амплитуды синусоиды, которая может быть определена с использованием статистики столкновений.

Из данных источника [14] следует, что вероятность столкновения судов ночью больше в два раза, чем днем. Отсюда нетрудно оценить значения коэффициента K_ϕ днем и ночью. В остальное время суток его значения могут быть определены линейной интерполяцией либо по формуле (2).

Определим значение коэффициента человеческого фактора в ночное время. Амплитуда суточных колебаний коэффициента, учитывающего человеческий фактор, определяется выражением

$$A = \frac{1 - \sqrt{2} - K_0^* + \sqrt{2} \cdot K_0^*}{\sqrt{2} - 1 - K_0^* - \sqrt{2} \cdot K_0^*}. \quad (3)$$

Значения амплитуды суточных колебаний коэффициента, учитывающего человеческий фактор, приведены в табл. 2.

**Амплитуды суточных колебаний коэффициента,
 учитывающего человеческий фактор**

K_0^*	0,85	0,90	0,95	0,99
A	$3,79 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$

Обсуждение (Discussion)

Из выполненного расчета видно, что даже незначительные изменения коэффициента, учитывающего человеческий фактор, в ночное время (всего на 0,022 с 0,95 до 0,928 и на 0,004 с 0,99 до 0,986) изменяют вероятность столкновения в два раза. Это свидетельствует о том, что для исключения навигационных аварий или хотя бы значительного сокращения их числа значения коэффициента, учитывающего человеческий фактор, должны быть на достаточно высоком уровне (по крайней мере, не ниже $K_{\phi} \geq 0,95$). В этом случае следует сразу же отметить, что приведенные в табл. 1, по данным Н. В. Митрофановой, значения коэффициента, учитывающего человеческий фактор, следует пересмотреть, так как на «хорошо» диапазон изменения K_{ϕ_i} от 0,76 до 0,84 вообще недопустим, а на «отлично» должно быть K_{ϕ_i} не ниже 0,98, а лучше 0,99.

Рассмотрим применение предложенной методики на конкретном примере. Для этого воспользуемся вероятностной моделью оценки риска столкновения судов при движении судна в потоке прочих судов с произвольным направлением движения (рис. 2) с целью анализа вероятностей безаварийного плавания судна в течение некоторого интервала времени t [15]. Вероятность столкновения в рамках неуправляемой модели [15] определится из условия

$$P_{\text{неуправл}} = 1 - e^{-D(H,t)} \quad (4)$$

следующим образом:

$$D(H,t) = D_I(H,t) + D_{II}(H,t); \quad (5)$$

$$D_I(H,t) = ItVM_{\lambda} M(|\cos(\alpha)|) = ItVM_{\lambda} \int_{-\pi}^{\pi} |\cos(a)| f_{\alpha}(a) da; \quad (6)$$

$$D_{II}(H,t) = ItLM_v M(|\cos(\alpha)|) = ItLM_v \int_{-\pi}^{\pi} |\cos(a)| f_{\alpha}(a) da, \quad (7)$$

где $f_{\alpha}(a)$ — плотность распределения курсового угла α ;

t — рассматриваемый интервал времени;

H — вектор характеристик заданного судна;

L — длина заданного судна;

V — скорость заданного судна;

I — плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов;

M_v — математическое ожидание скоростей прочих судов;

M_{λ} — математическое ожидание длин прочих судов.

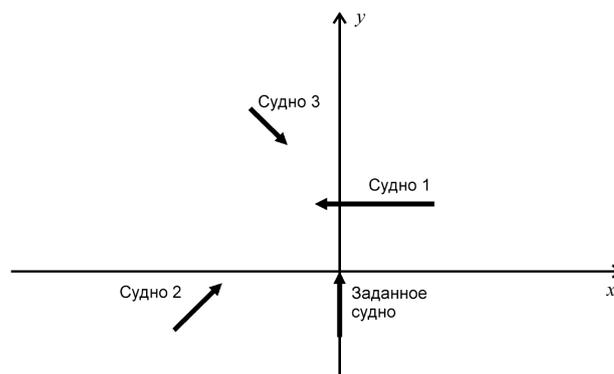


Рис. 2. Схема движения в произвольном потоке

На рис. 3 представлены результаты оценки вероятности столкновения судов $P_{\text{неуправл}}$ в рамках неуправляемой модели [15] для различных значений плотности интенсивности пуассоновского поля прочих судов: $I_1 = 0,1$ миля⁻², $I_2 = 0,05$ миля⁻² и $I_3 = 0,01$ миля⁻². Пусть скорость заданного судна $V = 6$ уз, длина $L = 100$ м, математическое ожидание скоростей и длин прочих судов: $M_v = 7,5$ уз и $M_\lambda = 120$ м соответственно.

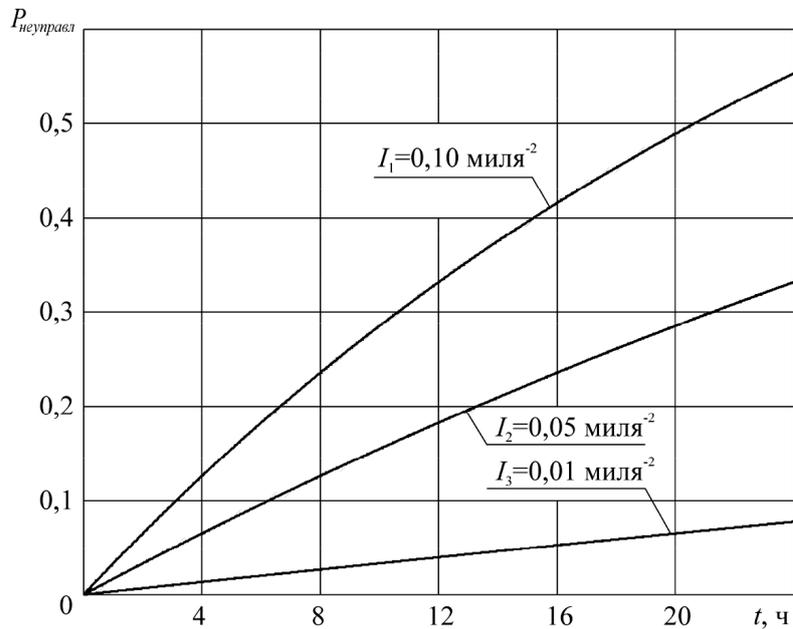


Рис. 3. Зависимость вероятности столкновения судов от времени в рамках неуправляемой модели

Для упрощения анализа будем полагать, что коэффициенты, учитывающие человеческий фактор для судоводителей всех судов, которые имеют вероятность столкнуться, будут одинаковыми. Тогда формула (1) трансформируется следующим образом:

$$P_{\text{столкн}} = P_{\text{неуправл}} \cdot [1 - K_\phi]^2. \quad (8)$$

Результаты расчета вероятности $P_{\text{столкн}}$ по формуле (8) для различных значений коэффициента K_ϕ представлены в табл. 3. Полученные значения вероятности столкновения хорошо согласуются с данными работ [16], [17], что свидетельствует об адекватности предлагаемого подхода к учету влияния человеческого фактора при оценке риска столкновения судов. Проанализируем результаты расчета, представленные в этой таблице. Для этого зададимся некоторой вероятностью, например, 10^{-4} , которую примем за нормативную и выше которой не должно быть в процессе эксплуатации судов. Эти «недопустимые» вероятности выделены в виде темных сегментов. В рассматриваемой таблице проанализирована лишь одна колонка табл. 1 с качественной характеристикой «отлично» и диапазоном изменения коэффициента, учитывающего человеческий фактор при $K_\phi = (0,85 \dots 1,0)$. Видно, что в диапазоне изменения плотности интенсивности пуассоновского поля судов от $0,05$ миля⁻² до $0,2$ миля⁻² (темный сегмент) при коэффициенте $K_\phi = 0,85$ в дневное время вероятность столкновения судов находится на уровне 10^{-3} , что, конечно, нежелательно. При коэффициенте $K_\phi = 0,9$ нормативная вероятность 10^{-3} превышена в дневное время практически только при плотности интенсивности пуассоновского поля судов $0,2$ миля⁻².

Из табл. 3 видно, что при этих же значениях коэффициента ($K_\phi = 0,85$ и $K_\phi = 0,9$) в ночное время, при плотности интенсивности пуассоновского поля судов $0,01$ миля⁻², вероятность столкновения не превысит нормативную вероятность 10^{-4} , в остальных случаях, т. е. при плотности интенсивности пуассоновского поля судов в диапазоне $0,05$ – $0,2$ миля⁻², вероятность столкновения превышает указанный предел. В то же время при коэффициенте $K_\phi = 0,95 \dots 0,99$ условие

непревышения нормативной вероятности 10^{-4} для дневного и ночного времени удовлетворяется практически полностью.

Только в одном случае в ночное время при $K_{\phi} = 0,928$ и плотности интенсивности пуассоновского поля судов $0,2$ миль $^{-2}$ на четвертом часе несения вахты вероятность столкновения превышает нормативную 10^{-4} . В этом случае довести вероятность до уровня нормативной можно либо повышением исходного значения коэффициента K_{ϕ} , учитывающего человеческий фактор для дневного времени, либо ограничением вахты до трех часов, если это возможно. Такой подход может быть применен для районов с высокой плотностью потока судов.

Таблица 3

**Результаты оценки вероятности столкновения судов
 с учетом влияния человеческого фактора**

$t, \text{ч}$	$I, \text{миля}^{-2}$				K_{ϕ}	
	0,01	0,05	0,1	0,2		
1	$7,54 \cdot 10^{-5}$	$3,74 \cdot 10^{-4}$	$7,43 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	0,85	День
2	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$7,43 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$		
3	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$4,10 \cdot 10^{-3}$		
4	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$5,30 \cdot 10^{-3}$		
1	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$3,30 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	0,90	
2	$6,69 \cdot 10^{-5}$	$3,30 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$		
3	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$4,91 \cdot 10^{-4}$	$9,58 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$		
4	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$		
1	$8,38 \cdot 10^{-6}$	$4,16 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	0,95	
2	$1,67 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$		
3	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$4,56 \cdot 10^{-4}$		
4	$3,34 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$5,89 \cdot 10^{-4}$		
1	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$1,66 \cdot 10^{-6}$	$3,30 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	0,99	
2	$6,69 \cdot 10^{-7}$	$3,30 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$		
3	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$4,91 \cdot 10^{-6}$	$9,58 \cdot 10^{-6}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$		
4	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$		
1	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$7,48 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$	0,788	Ночь
2	$3,01 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$		
3	$4,50 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$4,31 \cdot 10^{-3}$	$8,20 \cdot 10^{-3}$		
4	$5,99 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$		
1	$6,65 \cdot 10^{-5}$	$3,31 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	0,859	
2	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$		
3	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$9,76 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$		
4	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$		
1	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$8,63 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	0,928	
2	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$6,51 \cdot 10^{-4}$		
3	$5,19 \cdot 10^{-5}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^{-4}$	$9,46 \cdot 10^{-4}$		
4	$6,91 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$6,51 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$		
1	$6,57 \cdot 10^{-7}$	$3,26 \cdot 10^{-6}$	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	0,986	
2	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$6,47 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$		
3	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$9,62 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$		
4	$2,61 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$	$4,62 \cdot 10^{-5}$		

Выводы (Summary)

На основании проведенных исследований можно сделать некоторые предварительные выводы, а именно:

1. Предложенная структура коэффициента, учитывающего человеческий фактор, позволяет оценивать его колебания в течение суток и определять оптимальную продолжительность рейса.
2. Предложенный подход позволяет выбрать нормативную вероятность навигационных аварий.
3. С целью минимизации вероятности столкновения судов уровень допустимых коэффициентов, учитывающих человеческий фактор, должен находиться в диапазоне $K_{\phi} = 0,95 \dots 1,0$.
4. Незначительные суточные колебания коэффициента, учитывающего человеческий фактор (7 % при $K_{\phi} = 0,85$) могут существенно изменить вероятность столкновения (в 2 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейхман В. В. Безопасность мореплавания и человеческий фактор: учебное пособие / В. В. Вейхман. — Калининград: БГАРФ, 1998. — 58 с.
2. Кацман Ф. М. Человеческий фактор в проблеме обеспечения безопасности судоходства / Ф. М. Кацман. — СПб.: СПбГУВК, 2003. — 150 с.
3. Клименко В. Д. Безопасность мореплавания и учет человеческого фактора / В. Д. Клименко // Морской транспорт. Серия: Судовождение, связь и безопасность мореплавания: экспресс-информация. — 2002. — № 8 (339). — С. 43–49.
4. Котик М. А. Природа ошибок человека–оператора (на примерах управления транспортными средствами) / М. А. Котик, А. М. Емельянов. — М.: Транспорт, 1993. — 252 с.
5. Кобзев В. В. Оценка морально-волевых характеристик судоводителей в процессе обучения на тренажере / В. В. Кобзев, М. Л. Маринов, И. В. Телюк // Системы управления и обработки информации. — 2013. — № 27. — С. 116–124.
6. Туркин В. А. Учет психофизиологических свойств человека при оценке вероятности возникновения происшествий / В. А. Туркин // Морской флот. — 2002. — № 1. — С. 18–19.
7. Celik M. Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents / M. Celik, S. Cebi // Accident Analysis & Prevention. — 2009. — Vol. 41. — Is. 1. — Pp. 66–75. DOI: 10.1016/j.aap.2008.09.004.
8. Macrae C. Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions / C. Macrae // Maritime Policy & Management. — 2009. — Vol. 36. — Is. 1. — Pp. 21–38. DOI: 10.1080/03088830802652262.
9. Martins M. R. Human error contribution in collision and grounding of oil tankers / M. R. Martins, M. C. Maturana // Risk Analysis: An International Journal. — 2010. — Vol. 30. — Is. 4. — Pp. 674–698. DOI: 10.1111/j.1539–6924.2010.01392.x.
10. O'Neil W. The human element in shipping / W. O'Neil // WMU Journal of Maritime Affairs. — 2003. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 95–97. DOI: 10.1007/BF03195037.
11. Zhang Y. Studies on human factors in marine engine accident / Y. Zhang, Y. Zhan, Q. Tan // 2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. — IEEE, 2009. — Vol. 1. — Pp. 134–137. DOI: 10.1109/KAM.2009.246.
12. Pedersen P. T. Collision and Grounding Mechanics / P. T. Pedersen // Proceedings of WEMT'95. — Copenhagen, 1995. — Pp. 125–157.
13. Митрофанова Н. В. Методические основы оценки человеческого фактора в системе управления рисками судоходных компаний: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Надежда Владимировна Митрофанова. — СПб., 2007. — 28 с.
14. Юдович А. Б. Предотвращение навигационных аварий морских судов / А. Б. Юдович. — М.: Транспорт, 1988. — 346 с.
15. Бураковский Е. П. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитровский // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 3–4 (42). — С. 11–18.
16. Hänninen M. The Effects of Causation Probability on the Ship Collision Statistics in the Gulf of Finland / M. Hänninen, P. Kujala // TransNav. — 2010. — Vol. 4. — No. 1. — Pp. 79–84.
17. Ylitalo J. Ship–Ship Collision Probability of the Crossing Area between Helsinki and Tallinn / J. Ylitalo. — Helsinki: Helsinki University of Technology, 2009. — 26 p.

REFERENCES

1. Veikhman, V. V. *Bezopasnost' moreplavaniya i chelovecheskii faktor: uchebnoe posobie*. Kaliningrad: BGARF, 1998.
2. Katsman, F. M. *Chelovecheskii faktor v probleme obespecheniya bezopasnosti sudokhodstva*. SPb.: SPGUVK, 2003.
3. Klimenko, V. D. "Bezopasnost' moreplavaniya i uchet chelovecheskogo faktora." *Morskoj transport. Seriya: Sudovozhdenie, svyaz' i bezopasnost' moreplavaniya: Ekspress-informatsiya* 8(339) (2002): 43–49.
4. Kotik, M. A., and A. M. Emel'yanov. *Priroda oshibok cheloveka-operatora (na primerakh upravleniya transportnymi sredstvami)*. M.: Transport, 1993.
5. Kobzev, V. V., M. L. Marinov, and I. V. Telyuk. "Otsenka moral'no-volevykh kharakteristik sudovoditelei v protsesse obucheniya na trenazhere." *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* 27 (2013): 116–124.
6. Turkin, V.A. "Uchet psikhofiziologicheskikh svoystv cheloveka pri otsenke veroyatnosti vozniknoveniya proisshestvii." *Morskoi flot* 1 (2002): 18–19.
7. Celik, Metin, and Selcuk Cebi. "Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents." *Accident Analysis & Prevention* 41.1 (2009): 66–75. DOI: 10.1016/j.aap.2008.09.004.
8. Macrae, Carl. "Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions." *Maritime Policy & Management* 36.1 (2009): 21–38. DOI: 10.1080/03088830802652262.
9. Martins, Marcelo Ramos, and Marcos Coelho Maturana. "Human error contribution in collision and grounding of oil tankers." *Risk Analysis: An International Journal* 30.4 (2010): 674–698. DOI: 10.1111/j.1539–6924.2010.01392.x.
10. O'Neil, William A. "The human element in shipping." *WMU Journal of Maritime Affairs* 2.2 (2003): 95–97. DOI: 10.1007/BF03195037.
11. Zhang, Yue, Yulong Zhan, and Qinming Tan. "Studies on human factors in marine engine accident." *2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*. Vol. 1. IEEE, 2009. 134–137. DOI: 10.1109/KAM.2009.246.
12. Pedersen, Preben Terndrup. "Collision and Grounding Mechanics." *Proceedings of WEMT'95*. Copenhagen, 1995. 125–157.
13. Mitrofanova, N.V. *Metodicheskie osnovy otsenki chelovecheskogo faktora v sisteme upravleniya riskami sudokhodnykh kompanii*. Abstract of PhD diss. SPb., 2007.
14. Yudovich, A.B. *Predotvrashchenie navigatsionnykh avarii morskikh sudov*. M.: Transport, 1988.
15. Burakovskiy, Evgeniy P., Pavel E. Burakovskiy, and Vladimir A. Dmitrovskiy. "A mathematical model of collision risk assessment of vessels moving in an arbitrary direction." *Marine intelligent technologies* 3–4(42) (2018): 11–18.
16. Hänninen, M., and P. Kujala. "The Effects of Causation Probability on the Ship Collision Statistics in the Gulf of Finland." *TransNav* 4.1 (2010): 79–84.
17. Ylitalo, J. *Ship–Ship Collision Probability of the Crossing Area between Helsinki and Tallinn*. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бураковский Евгений Петрович —
 доктор технических наук
 ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
 технический университет»
 236022, Российская Федерация, г. Калининград,
 Советский пр., 1
 e-mail: e_burakovsky@mail.ru
Бураковский Павел Евгеньевич —
 кандидат технических наук
 ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
 технический университет»
 236022, Российская Федерация, г. Калининград,
 Советский пр., 1
 e-mail: paul_b@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burakovskiy, Evgeny P. —
 Dr. of Technical Sciences
 Kaliningrad State Technical University
 1, Sovetskiy Av., Kaliningrad, 236022,
 Russian Federation
 e-mail: e_burakovsky@mail.ru
Burakovskiy, Pavel E. —
 PhD
 Kaliningrad State Technical University
 1, Sovetskiy prospekt, Kaliningrad, 236022,
 Russian Federation
 e-mail: paul_b@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 марта 2019 г.
 Received: March 19, 2019.

**OPTIMAL ALGORITHM OF HYPOTHESES TESTING
AT THE SHIP USE RESEARCH BASED
ON THE GEOCHRONOLOGICAL TRACKING**

Y. A. Ivakin^{1,2}, S. N. Potapychev^{1,2}, R. Y. Ivakin³

¹ — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

² — Concern OCEANPRIBOR JSC, St. Petersburg, Russian Federation

³ — The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation

Information technology of the geochronological tracking is an assembly of processes that accumulate and integrate data about geographic relocation of ships, figures for a given time interval and represent the results as a generalizing graph in GIS. Hypotheses on the stable tendencies in migration could be represented as the above graph's sub-graphs. Such tendencies testing is reduced to the search and evaluation of the statistical significance of the matching graphs isomorphism. Full-featured development of computer interpretation of the graph theory methods based on geochronological tracking provides new quality of research using modern GIS-tools. Namely, researcher can use the quantitative methods of the corresponding logical-analytical apparatus. The proposed paper deals with a consideration of qualitatively new possibilities of such approach and the corresponding algorithmic apparatus. Dispatching for geospatial processes of maritime transport with implementation of geochronological tracking tools is tightly related with completion of more developed model of data processing in the automated vessel traffic control system. The proposed model is focused not only on each vessel's data processing but also on spatial situations tracking based on the data of geographic theatre. This is the main feature for implementation of software component of geochronological tracking for dispatching of geospatial processes for maritime transport. The article is dedicated to the thorough consideration of this feature.

Keywords: Geographic information systems, GIS-technologies for historic research, geochronological track and tracking, graphs isomorphism, optimal algorithm, GIS-based interdisciplinary research.

For citation:

Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapychev, and Roman Y. Ivakin. "Optimal algorithm of hypotheses testing at the ship use research based on the geochronological tracking." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 448–460. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.

УДК 681.1.003

**РАЦИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
НА БАЗЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕКИНГА**

Я. А. Ивакин^{1,2}, С. Н. Потапычев^{1,2}, Р. Я. Ивакин³

¹ — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена информационная технология геохронологического трекинга как совокупность процессов накопления и интеграции данных о географическом перемещении судов, должностных лиц, артефактов за установленный период времени с представлением результатов в виде обобщающего графа в географической информационной системе или в ГИС-приложении соответствующей информационно-логистической системы. Гипотезы об устойчивых тенденциях в миграции указанных сущностей представлены как подграфы указанного графа. Показано, что проверка таких гипотез сведется к поиску и оценке

статистической значимости изоморфизма соответствующих графов. Исследованы различные аспекты того, что полнофункциональное развитие компьютерной интерпретации методов теории графов на базе геохронологического трекинга способно обеспечить новое качество ретроспективных исследований вопросов специфики организации эксплуатации водного транспорта с использованием современного ГИС-инструментария. Такие аспекты выражаются в предоставлении возможности исследователю использовать количественные методы соответствующего логико-аналитического аппарата в своей предметной области — области организации и реализации перевозок пассажиров и грузов средствами водного транспорта как на внутренних водных путях страны, так и на международных морских линиях перевозок. Такая возможность открывает новые пути для анализа логистики современных транспортно-поставочных сетей, оптимизации транспортных потоков, систем диспетчеризации водного транспорта. Рассмотрению качественно новых возможностей такого подхода, его сильных и слабых сторон, а также рационализации соответствующего алгоритмического аппарата посвящена данная статья. Определены также направления рационализации алгоритмов проверки гипотез исследования на базе геохронологического трекинга в ГИС, которые связаны с постановкой и решением оптимизационной задачи определения временной сложности указанных алгоритмов, а также определения строгих граничных условий такой оптимизации.

Ключевые слова: Географические информационные системы, ГИС-технологии для ретроспективных исследований, геохронологический трек и трекинг, изоморфизм графов, рациональный алгоритм, междисциплинарные исследования на базе ГИС.

Для цитирования:

Ивакин Я. А. Рациональный алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта на базе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С.448–460. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.

Введение (Introduction)

Достижение высокой эффективности, безопасности эксплуатации судов и других объектов водного транспорта невозможно без ретроспективного анализа организации и результатов их использования. Именно результаты такого анализа являются основой для обоснования стратегических управленческих решений по развитию маршрутной сети, открытию новых линий перевозок и др. Мощным средством такого анализа на базе геоинформационных технологий является *геохронологический трекинг*. Процесс геохронологического трекинга представляет собой совокупность способов сбора первичной ретроспективной, хронологической информации и последовательности приемов обобщения геохронологических треков судов и кораблей (объектов, артефактов или их совокупности) на электронной карте (в ГИС). Соответственно геохронологический трек есть интеграция хронологических и географических данных в виде графа, соединяющего географические точки нахождения указанных исторических сущностей (вершины трека имеют строгое историко-географическое определение, дуги носят характер условно-логической связи). В статьях [1], [2] дано комплексное описание узкоспециализированной программной технологии геохронологического трекинга применительно к проблематике водного транспорта, в работе [3] показаны возможности применения аналитического аппарата теории графов и статистических исследований на базе геохронологического трекинга.

Выполнение разработки апробационных примеров построения геохронологических треков по данным из архивных источников для различных групп исторических личностей позволило сделать вывод о том, что финишная версия графа для достаточно представительной выборки исторических сущностей (личностей, объектов и др.), как правило, имеет высокосложную и полно- либо высокосвязную структуру. Такая структура может быть строго упорядочена, о чем свидетельствует пример трека, приведенный на рис. 1. Именно на основе такого итогового графа геохронологического трекинга становится возможным исследование различных миграционных процессов, выявления некоторых частных исторических закономерностей в перемещении социальных групп, статистически подтвержденная проверка исследовательских гипотез о характере миграций. Существование, концептуальная модель и методологический аппарат таких исследований детально описаны в статье [3].

Концептуальная идея проверки исследовательских гипотез заключается в следующем: итоговый граф геохронотрекинга представляется как граф-базис, в структуре которого выявляется подграф изоморфный заданному, т. е. устанавливается наличие взаимно однозначного отображения одного графа на подграф другого, при котором сохраняется отношение инцидентности [4,5]. Граф, на изоморфность к которому в составе базового графа геохронологического трекинга определяется подграф, топологически описывает ту или иную определенную гипотезу исследования об устойчивой особенности в перемещениях исторических личностей, объектов или других существ в географическом пространстве. Далее определяется степень устойчивости в признании гипотезы исследования о выявляемой особенности в перемещениях с использованием статистического аппарата доверительной вероятности и доверительных интервалов.

Программно-алгоритмическая реализация проверки исследовательских гипотез на базе геохронологического трекинга представляет собой сложную итеративную вычислительную процедуру, практическое воплощение которой может иметь экспоненциальную сложность и приводить к трансвычислительному характеру решения задачи при определенных входных данных и граничных условиях. Именно этот факт диктует необходимость обоснования и разработки рационального или оптимального алгоритма проверки исследовательских гипотез на базе геохронологического трекинга, т. е. такой локализации вычислительного алгоритма решения задачи определения всех изоморфных вложений в граф геохронотрека, которая позволяет за конечное число подстановок (итераций) определить все комбинации вложений, изоморфных заданному графу-гипотезе, и не сделать решение трансвычислительным.

Синтез указанного обобщенного алгоритма поиска в графе-базисе подграфа-вложения, изоморфного заданному, применительно к специфике входных данных и граничных условий проверки исследовательских гипотез на базе геохронологического трекинга в ГИС, а также обоснование его рационального характера является предметом рассмотрения данной статьи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Базовым методом описываемого исследования выступает графовая модель проверки исследовательских гипотез на базе геохронотрекинга. Итогом реализации трекинга как специализированного программного процесса в ГИС является географически привязанный граф, обобщающий геохронологические треки отдельных исторических существностей или артефактов, информация о миграциях которых занесена в соответствующую базу данных [6]. Именно этот граф является базисом проверки исследовательских гипотез, т. е. в его составе выявляются подграфы, изоморфные графам-гипотезам (рис. 1).

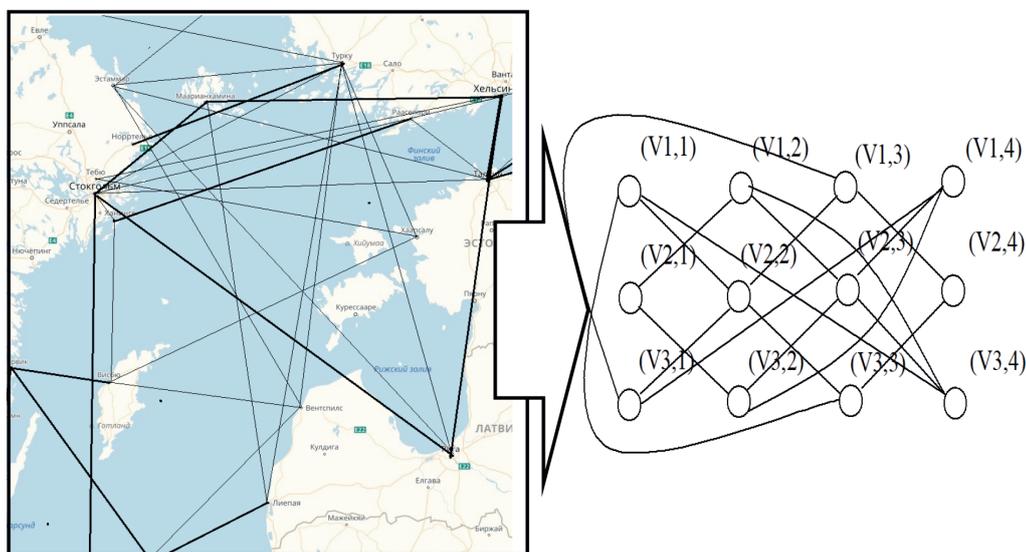


Рис. 1. Рассмотрение геохронологического трека в ГИС в качестве упорядоченного графа

Представленный на рис. 1 пример обобщающего геохронотрека дает возможность понять всю сложность и комбинаторную вариабельность решения частной задачи рационального выделения подграфа, изоморфного заданному. Существо указанного выделения заключается в следующем: два графа $G_1 = (X, U)$ и $G_2 = (X', U')$ изоморфны, если между парами множеств их вершин, ребер и дуг существуют взаимно однозначные соответствия, сохраняющие смежность и ориентацию для дуг [7]. Значение попарно изоморфных графов с заданным значением вершин и заданным значением ребер конечно. Изоморфное отображение φ графа G_1 на граф G_2 задается перестановкой

$$\varphi = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_i & \dots & x_p \\ \varphi(x_1) & \varphi(x_2) & \dots & \varphi(x_i) & \dots & \varphi(x_p) \end{pmatrix},$$

называемой *изоморфной*, т. е. при распознавании изоморфизма графов $G_1 = (X_1, R_1)$ и $G_2 = (X_2, R_2)$ необходимо определить факт их изоморфности. В случае установления изоморфизма необходимо указать изоморфную подстановку. Ввиду того, что в теории графов не определены граничные условия и условия оптимальности решения задачи определения строгого соответствия графов, правомерно применение целого ряда математических методов установления изоморфизма в качестве методологического базиса разработки искомого алгоритма в случае проверки гипотез исследования на базе геохронологического трекинга.

Условно все множество математических методов установления изоморфизма графов (методы решения задачи распознавания изоморфизма графа заданному) можно классифицировать как это показано на рис. 2 [7]. Очевидно, что доминирующими математическими методами в определении изоморфизма графов являются методы, использующие инварианты (инвариант графа — это некоторая функция, сопоставляющая графу L — соответствующий элемент $f(L)$ из множества M , элементами которого выступают числа или системы чисел, векторы, многочлены, матрицы и другие алгебраические структуры. Для изоморфных графов значения этой функции совпадают [8]. В соответствии с разнообразием выбора однотипных фрагментов графа различают три класса инвариантов: локальные, квазиглобальные и глобальные.

Условно все множество математических методов установления изоморфизма графов (методы решения задачи распознавания изоморфизма графа заданному) можно классифицировать как это показано на рис. 2 [7]. Очевидно, что доминирующими математическими методами в определении изоморфизма графов являются методы, использующие инварианты (инвариант графа — это некоторая функция, сопоставляющая графу L — соответствующий элемент $f(L)$ из множества M , элементами которого выступают числа или системы чисел, векторы, многочлены, матрицы и другие алгебраические структуры. Для изоморфных графов значения этой функции совпадают [8]. В соответствии с разнообразием выбора однотипных фрагментов графа различают три класса инвариантов: локальные, квазиглобальные и глобальные.



Рис. 2. Классификации математических методов установления изоморфизма графов

При решении задачи поиска изоморфизма графов при различных условиях (размерность графов, их регулярность, однородность и др.) определяется функция временной сложности самой задачи. Именно она позволяет конкретизировать математический метод решения задачи до прикладного алгоритма, адаптированного к граничным условиям геохронологического трекинга (упорядоченный граф, количество вершин n от 20 до 100 и др.). Как правило, это полиномиальный или экспоненциальный алгоритм поиска изоморфизма. Различия между двумя указанными типами алгоритмов особенно заметны при решении задач большой размерности.

Приведенные в таблице данные позволяют понять причины, по которым полиномиальные алгоритмы более предпочтительны для поиска изоморфизма на геохронотреке по сравнению с экспоненциальными: большинство экспоненциальных алгоритмов — это варианты полного перебора, в то время как полиномиальные алгоритмы можно построить лишь тогда, когда удастся строго формализовать предметную суть решаемой задачи. Иными словами, задача строго формализована, если для ее решения получен полиномиальный алгоритм [9].

Временная сложность экспоненциальных алгоритмов решения задачи поиска изоморфизма графов

Функция временной сложности	Размер графа-базиса (количество вершин n)				
	10	20	30	40	50
n	0,00001 с	0,00002 с	0,00003 с	0,00004 с	0,00005 с
n_2	0,0001 с	0,0004 с	0,0009 с	0,0016 с	0,0025 с
n_3	0,001 с	0,008 с	0,027 с	0,064 с	0,125 с
n_5	0,1 с	3,2 с	24,3 с	1,7 мин	5,2 мин
$2n$	0,001 с	1,0 с	17,9 мин	12,7 дней	35,7 лет
$3n$	0,059 с	58 с	6,5 лет	3855 столетий	2·108 столетий

В свою очередь, необходимо показать, что линейное установление изоморфизма графов алгоритмически отличается от более сложной задачи, т. е. распознавания изоморфного вложения в составе графа-базиса, изоморфного вложения или изоморфизма подграфа: граф G_2 изоморфно вложим в граф G_1 , если в графе G_1 существует подграф, изоморфный графу G_2 [4]. Эта задача отличается от задачи распознавания графов: в частности, чтобы решить задачу изоморфизма подграфа с использованием известных алгоритмов распознавания изоморфизма графов, необходимо реализовать процедуру выявления в графе G_1 подмножества вершин $X \subset X_1$, равномощного множеству вершин X_2 графа G_2 . Данная процедура включает k_1 действий, где $k_1 = \binom{p_1}{p_2}$, $p_1 = |X_1|$, $p_2 = |X_2|$. Следовательно, k_1 раз необходимо применить алгоритм распознавания изоморфизма графов как некоторую частную процедуру в составе более общего алгоритма.

Таким образом, конкретизация графовой модели проверки гипотез исторического исследования в ГИС заключается в определении наилучшего математического алгоритма решения задачи изоморфного вложения графов, соответствующего ограничениям и условиям предметной области процедуры геохронотрекинга.

Результаты (Results)

Выполнена рационализация процедуры распознавания изоморфного вложения подграфа-гипотезы в составе графа-базиса, обобщающего данные по перемещению судов и других объектов водного транспорта.

В целях разработки конкретизированного алгоритма распознавания изоморфного вложения подграфа-гипотезы в составе графа-базиса, применительно к задаче проверки исследовательских гипотез в ГИС структуре сводного геохронотрека, сопоставлен N -вершинный граф L . Пронумеровав его вершины натуральными числами, можно осуществить синтез изоморфного к L графа, вершинами которого служат эти числа. Вариантов такого графа будет $n!$, т. е. столько, сколько имеется перестановок из n элементов. Далее задается квадратная матрица:

$$A(L) = \|a_{ij}\|_n \quad (1)$$

с n строками и n столбцами, элементы которой определяются в виде:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я и } j\text{-я вершины в } L \text{ смежны;} \\ 0, & \text{если эти вершины не смежны.} \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что $a_{ii} = 0$ и матрица $A(L)$ симметрична: $a_{ij} = a_{ji}$. Такая матрица будет матрицей смежности графа L с заданной нумерацией вершин, т. е. эта квадратная матрица $A = \{a_{ij}\}$ будет являться матрицей смежности графа L , если при $a_{ij} = l$ в графе L вершины x_i и x_j соединены l ребрами, при $a_{ij} = 0$ вершины x_i и x_j в L несмежны.

Степенью $s(L, x)$ вершины x графа L называется число его вершин, смежных с x , или, что то же, число ребер, инцидентных этой вершине. При всяком изоморфизме \leftrightarrow графов L и L' соответствующие друг другу вершины должны иметь одинаковую степень, т. е. для любой $x \in X$ из $x \leftrightarrow x'$ ($x' \in X'$) должно выполняться равенство: $s(L, x) = s(L', x')$.

В самом деле, если для какой-то вершины x и соответствующей x' окажется $s(L, x) > s(L', x')$, то среди тех $s(L, x)$ вершин графа L' , которые отвечают смежным с x вершинам L , хотя бы одна не будет смежной с x' , т. е. соответствие \leftrightarrow не будет изоморфизмом, но это условие может оказаться приемлемым, в случае, если граф L' изоморфно вложен в граф L , обратное утверждение ложно. Также для ориентированных графов различают полустепени исхода и захода. *Полустепень исхода вершины* — это число инцидентных исходящих дуг, $S^-(x)$. *Полустепень захода вершины* — число инцидентных заходящих дуг, $S^+(x)$. Для удобства алгоритмизации полустепени захода вершин записываются в $n + 1$ строке, а полустепени исхода вершин — в $n + 1$ столбце матрицы смежности n -вершинного ориентированного графа геохронотрека или его подграфов.

Перестановочная матрица (матрица подстановок) представляет собой матрицу, в каждой строке и столбце которой находится по одной единице на пересечениях координат соответствующих друг другу вершин изоморфных графов. При умножении матрицы смежности одного графа слева и справа на перестановочную матрицу можно получить матрицу смежности изоморфного графа [8]. Тогда становится возможным предложить конкретизированный алгоритм распознавания изоморфного вложения подграфа-гипотезы в составе графа-базиса, соответствующий ограничениям и условиям предметной области геохронотрекинга.

В соответствии с приведенной ранее классификацией методов решения такой задачи, математический метод, реализованный в алгоритме, является комбинированным методом направленного перебора. Он объединяет в себе основные преимущества, которые дают методы направленного перебора, использующие локальные, квазиглобальные и глобальные инварианты. В разработанном в ходе исследования алгоритме используются следующие инварианты:

количество вершин $n(L)$;

количество ребер $m(L)$;

вектор степеней $S(L) = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, который, в частности, дает числовые инварианты: $s(L) = \min S(L, x)$ и $s'(L) = \max S(L, x)$;

полустепень исхода $S^-(x)$;

полустепень захода $S^+(x)$;

матрица смежности $A(L)$.

При синтезе указанного алгоритма были приняты следующие допущения и ограничения:

- предполагается, что вершины (ребра) графов имеют одинаковые свойства, т. е. в алгоритме не учитываются весовые коэффициенты вершин (ребер), поскольку для различных видов графов будут и различные требования к весовым коэффициентам;
- все вершины должны быть пронумерованы;
- рассматриваются только ориентированные графы, т. е. при анализе неориентированных графов необходимо задавать одно ребро как два, связывающих вершины в обоих направлениях;
- не рассматриваются «несвязанные» вершины, т. е. каждое географическое местоположение должно иметь хотя бы одно отношение с другим местоположением (географической точкой).

Методологическим базисом предлагаемого алгоритма решения задачи определения изоморфного вложения графа в граф-базис является тезис о том, что логические схемы $S_1 = \{A_1, R_1\}$ и $S_2 = \{A_2, R_2\}$ создают в совокупности систему ограничений, которая воздействует на множество гипотетически возможных вариантов решения, существенно его сокращая. Т. е. производится не перебор вариантов решения, что привело бы к N -факториальным переборам, а наложение системы ограничений по определенному алгоритму на специально созданное поле и на этом поле в результате последовательности действий, направленных на удовлетворение требований этой системы ограничений, формируется уже готовый вариант решения. Этот вариант может выглядеть для графов одинаковой размерности как матрица подстановок. Является допустимым поле с множеством гипотетически возможных подстановок представить в виде матрицы размерностью $n \times m$ для n и m — число вершин графов соответственно. Такую матрицу далее корректно называть *матрицей возможных подстановок*.

Логико-математическое существо матрицы возможных подстановок заключается в том, что на ней отражено все поле возможных решений текущей задачи изоморфизма графов. Так, при решении этой задачи для графов одинаковой размерности путем прямого перебора считается, что каждой вершине $x_i \in X_1$ графа 1 может быть сопоставлена любая из $x_j \in X_2$ графа 2. Количество возможных подстановок на матрице размерностью $n \times n$ будет равно $n!$. Эта матрица является удобным средством для фильтрации всех невозможных подстановок. Такая фильтрация имеет два этапа. На первом этапе производится устранение с поля возможных решений тех вариантов подстановок, которые невозможны принципиально по условию задачи (используя как фильтры глобальные, квазиглобальные и локальные инварианты, так и веса дуг или вершин и др.). На втором этапе фильтрация вариантов имеет место для выдвигаемых гипотез о той или иной подстановке.

Обсуждение (Discussion)

Суть работы предлагаемого алгоритма распознавания изоморфного вложения подграфа-гипотезы в составе графа-базиса, применительно к задаче проверки исследовательских гипотез в ГИС можно эффективно проиллюстрировать на примере решения рассматриваемой задачи для графов, приведенных на рис. 3. Матрицы смежности и матрица возможных подстановок для этой пары графов приведены на рис. 4. В матрице возможных подстановок C в первом столбце указаны все вершины графа B , в первой строке — все вершины графа A . В столбце $N + 1$ записывается количество возможных подстановок.

Первоначальное заполнение матрицы возможных подстановок осуществляется путем анализа полустепней исхода и захода исходных графов по правилу: вершина B_i может соответствовать вершине A_j только в том случае, если полустепени исхода и захода этой вершины больше, чем у вершины A_j , или равны. Тем самым производится первая фильтрация вариантов решения. Математически это формализуется и записывается в виде:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } s(B, b_i) \leq s(A, a_i) \text{ и } s(B, b_j) \leq s(A, a_j); \\ 0 & \text{— в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

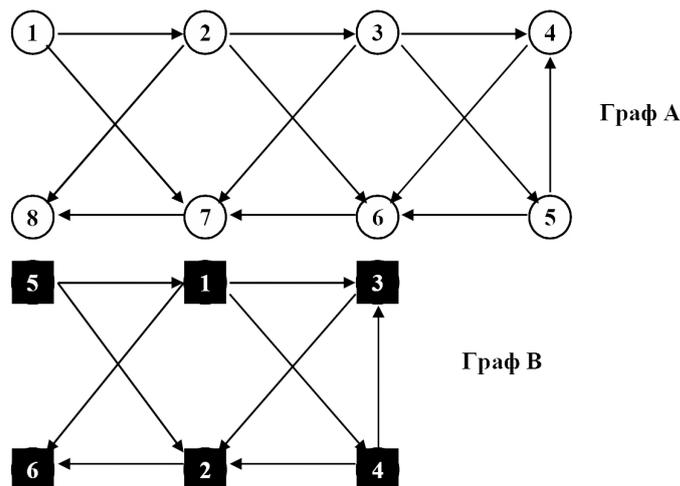


Рис. 3. Пример распознавания изоморфного вложения графа-гипотезы в составе графа-базиса

а)

Матрица смежности графа А

	1	2	3	4	5	6	7	8	$S^-(x)$
1	0	1	0	0	0	0	1	0	2
2	0	0	1	0	0	1	0	1	3
3	0	0	0	1	1	0	1	0	3
4	0	0	0	0	0	1	0	0	1
5	0	0	0	1	0	1	0	0	2
6	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S^+(x)$	0	1	1	2	1	3	3	2	

б)

Матрица смежности графа В

	1	2	3	4	5	6	$S^-(x)$
1	0	0	1	1	0	1	3
2	0	0	0	0	0	1	1
3	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	1	0	0	0	2
5	1	1	0	0	0	0	2
6	0	0	0	0	0	0	0
$S^+(x)$	1	3	2	1	0	2	

в)

Матрица возможных подстановок (матрица С)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Количество подстановок
B1	0	1	1	0	0	0	0	0	2
B2	0	0	0	0	0	1	1	0	2
B3	0	0	0	1	0	1	1	0	3
B4	0	1	1	0	1	0	0	0	3
B5	1	1	1	0	1	0	0	0	4
B6	0	0	0	1	0	1	1	1	4

Рис. 4. Матрицы смежности графов и возможных подстановок:
 а — для графа А; б — для графа В;
 в — вид результирующей матрица подстановок графа В в граф А

Дальнейшая корректировка матрицы производится путем наложения на нее следующей системы ограничений: графы не могут быть изоморфными, если в столбце матрицы «Количество возможных подстановок» имеется хотя бы одна нулевая строка. При однозначном соответствии вершины V_i вершине A_j ($V_i \leftrightarrow A_j$), в столбце j матрицы возможных подстановок (C) не должно быть других символов «1». Для удовлетворения требований этого ограничения необходимо исключить из матрицы в столбце j так называемые *лишние символы* «1». В связи с тем, что найденное соответствие для какой-либо вершины может оказаться ложным, исключение символов «1» из матрицы необходимо производить таким образом, чтобы оставалась возможность восстановления матрицы на определенном шаге. С этой целью введена переменная *Mirage*, значение которой изменяется после каждого цикла наложения системы ограничений на матрицу возможных подстановок. Из ранее изложенного следуют действия, которые математически можно представить так: если $C[N+1, i] = 1$ и $C[j, i] = \langle 1 \rangle$ то элементу $C[k, i]$, имеющему значение единица (для $k = 1 \dots m; k \neq i$), присвоить текущее значение переменной *Mirage*. Если все значения столбца матрицы «количество возможных подстановок» больше единицы, то для скорейшего нахождения решения, очевидно, необходимо взять для работы строку с наименьшим значением, а первой из неиспользованных ранее ячеек соответствующей строки присваивается так называемый *фокус*, т. е. назначается активная ячейка (определяются координаты вершин подстановки $C[\text{FocB}, \text{FocA}]$). Остальные символы «1» необходимо «закрыть» переменной *Mirage*.

При $V_i \leftrightarrow A_j$, вершинам B_k ($k = 1 \dots m$), смежным с B_j , могут соответствовать только смежные вершины A_l ($l = 1 \dots n$) с вершиной A_i . Для удовлетворения этого требования необходимо так называемые *лишние символы* «1» в матрице возможных подстановок «закрыть» переменной *Mirage*. Математически это можно записать следующим образом:

если $C[j, i] = \langle 1 \rangle$ и $B[j, \text{FocB}] = \langle 1 \rangle$ и $A[j, \text{FocA}] \neq \langle 1 \rangle$ то $C[j, i] = \text{Mirage}$;

если $C[j, i] = \langle 1 \rangle$ и $B[\text{FocB}, i] = \langle 1 \rangle$ и $A[\text{FocA}, i] \neq \langle 1 \rangle$ то $C[j, i] = \text{Mirage}$,

где A, B — исходные матрицы смежности;

C — матрица возможных подстановок.

Другие частные ограничения учитывают специфику распознавания подграфа-гипотезы в составе графа-базиса применительно к задаче проверки исследовательских гипотез в ГИС.

Приведенный перечень ограничений не является полным и закрытым. В данном случае ограничения выполняют роль логического фильтра. В зависимости от специфики структуры подграфа, описывающего гипотезу, в структуру графа-базиса могут вводиться так называемые *дополнительные фильтры-требования*. Тогда текстуальное описание работы алгоритма распознавания изоморфного вложения подграфа-гипотезы в составе графа-базиса применительно к задаче проверки исследовательских гипотез в ГИС, как работы программы решения задачи нахождения изоморфного вложения графов, можно представить в следующем виде (для примера графов, приведенных на рис. 3):

=> **Начало**

1. Выполнена процедура *Prov_0_str*. $Pr_0 = 0$ переход на *Prov_1_str*.

2. *Prov_1_str* => $Pr_1 = 0$ переход на *Prioritet*.

3. *Prioritet* (с наименьшим количеством подстановок две строки (1-я и 2-я). Выбор первой строки и присвоение ей первого приоритета). $PrTab[1] = 1$; $Mirage = '2'$; $PrEnd = 0$; переход на *Mirage1*.

4. *Mirage1*. Определена активная ячейка $C[1, 2]$, т. е. выдвинута гипотеза, что $B1 \leftrightarrow A2$. На основании этой гипотезы получается: $C[1, 3], C[4, 2], C[5, 2] = '2'$; $PrExit = 0$; $Pr_0 = 0$. Переход на *Mirage3*.

5. *Mirage3*. В связи с тем, что $B1$ имеет исходы в $B3, B4, B6$ ($B1 \rightarrow B3, B4, B6$), а $A2 \rightarrow A3, A6, A8$, то, следовательно, и вершинам $B3, B4, B6$ могут соответствовать только вершины из множества $A3, A6, A8$. В таком случае в матрице C получается: $C[3, 4], C[3, 7], C[4, 2], C[4, 5], C[6, 4], C[6, 7] = '2'$; аналогично для $B \leftarrow B5$ и для $A2 \leftarrow A1$, т. е. $B5 \leftrightarrow A1$, а $C[5, 3], C[5, 5] = '2'$; переход на *Mirage2*;

6. *Mirage2*. $C[2, 6], C[6, 6] = '2'$. Переход на *Prov_1_str* => *ZapolnMatrCM* => *ProvEnd*. $PrExit = 1$ (найденная перестановочная матрица оказалась неверной) => $Nvar = 0$ => *ExitToHome* (восстановление матрицы C в прежнем виде) => *Mirage1*.

7. *Mirage1*. Определена активная ячейка $C[1, 3]$, т. е. выдвинута гипотеза, что $B1 \leftrightarrow A3$. На основании этой гипотезы получается: $C[1, 2], C[4,3], C[5,3] = '2'$; $PrExit = 0$; $Pr_0 = 0$. Переход на *Mirage3*.

8. *Mirage3*. В связи с тем, что $B1 \rightarrow B3, B4, B6$, а $A3 \rightarrow A4, A5, A7$, то, следовательно, и вершинам $B3, B4, B6$ могут соответствовать только вершины из множества $A4, A5, A7$. В таком случае в матрице C получается: $C[3, 6], C[4, 2], C[6, 6], C[6, 8] = '2'$; аналогично для $B1 \leftarrow B5$ и для $A3 \leftarrow A2$, т. е. $B5 \leftrightarrow A2$, а $C[5, 1], C[5, 5] = '2'$; переход на *Mirage2*.

9. *Mirage2*. Изменений матрицы C не происходит, переход на *Prioritet*.

10. *Prioritet*. Активной выбирается строка 4. $Pr = 2$; ($PrTab[4]=2$); $Mirage = '3'$. Переход на *Mirage1*.

11. *Mirage1*. Определена активная ячейка $C[4,5]$, т. е. выдвинута гипотеза, что $B4 \leftrightarrow A5$. Переход на *Mirage3*.

12. *Mirage3*. В связи с тем, что $B4 \rightarrow B2, B3$, а $A5 \rightarrow A4, A6$, то, следовательно, и вершинам $B2, B3$ могут соответствовать только вершины из множества $A4, A6$. В таком случае в матрице C получается: $C[2, 7], C[3, 7] = '3'$; аналогично для $B4 \leftarrow B1$ и для $A5 \leftarrow A3$, т. е. $B1 \leftrightarrow A3$, изменений матрицы не происходит; переход на *Mirage2*.

13. *Mirage2*. $C[6,4] = '3'$. Переход на *Prov_1_str* => *ZapolnMatrCM* => *ProvEnd*. $PrExit = 1$. (решение найдено) => $Nvar = 1$ => *Prioritet* (попытка поиска автоморфизмов) => $ProvEnd = 1$.
 => **Конец.**

При этом матрица возможных подстановок будет в процессе выполнения программы в соответствии с описанным алгоритмом принимать вид, последовательно представленный на рис. 5.

а)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Количество подстановок
B1		1	2						1
B2						2	1		1
B3				2		1	2		1
B4		2	1		2				1
B5	1	2	2		2				1
B6				2		2	2	1	1

б)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Количество подстановок
B1		2	1						1
B2						1	1		2
B3				1		2	1		2
B4		2	2		1				1
B5	2	1	2		2				1
B6				1		2	1	2	2

в)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Количество подстановок
B1		2	1						1
B2						1	3		1
B3				1		2	3		1
B4		2	2		1				1
B5	2	1	2		2				1
B6				3		2	1	2	1

Рис. 5. Динамика изменений вида матрицы возможных подстановок: а — на первой итерации; б — на второй итерации; в — в результате выполнения алгоритма

Из приведенной динамики изменений вида матрицы возможных подстановок видно, что корректировки выполнялись на основе выдвинутых трех гипотез соответствия пар вершин и за-

ключались, по сути дела, лишь в так называемой *подгонке матрицы возможных подстановок под требования системы ограничений для конкретного вида графа-гипотезы*.

Заключение (Conclusion)

Использование алгоритмов и вычислительных процедур теории графов применительно к аппарату геохронологического трекинга дает принципиально новые потенциальные возможности для внедрения строгих математических и расчетных методик в сфере ГИС-задач для ретроспективных исследований. Также очевидна и перспективность дальнейшей адаптации расчетных методов, моделей и методик «мягких» вычислений (использование нечетких множеств и нечетких чисел, функций лингвистической переменной и др.) для ГИС-приложений, применяемых в ходе реализации социологических, статистических и других исследовательских ГИС-проектов. Данный подход уже сегодня является предметом интереса специалистов в области вычислительной математики, современной алгоритмики и геоинформатики, что подтверждается публикациями [10]–[12]. Он может быть интересен специалистам по автоматизации управления водным транспортом, а также исследователям, использующим теорию графов и ее приложения в решении задач водного транспорта, о чем свидетельствуют работы [13]–[15]. Также возможен интерес к предлагаемым приложениям теории графов в смежных областях, что наглядно видно из статей [16], [17].

Дальнейшие направления рационализации алгоритмов проверки гипотез исследования на базе геохронологического трекинга в ГИС связаны с постановкой и решением оптимизационной задачи определения временной сложности указанных алгоритмов, определения строгих граничных условий такой оптимизации и др. Констатация перспективности описанных направлений позволяет прогнозировать широкое внедрение оптимизированных расчетных алгоритмов в ГИС-инструменты поддержки прикладных исследований использования различных объектов водного транспорта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-07-00006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивакин Ян А.* Информационная технология геохронологического трекинга для проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта / Ян А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
2. *Ивакин Я. А.* Геохронологический трекинг – специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования / Ян А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. — 2016. — № 1-2 (15-16). — С. 3–11.
3. *Нечепуренко М. И.* Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко [и др.]. — Новосибирск: Наука (Сиб. отд-ние), 1990. — 515 с.
4. *Зыков А. А.* Основы теории графов / А. А. Зыков. — М.: Вузовская книга, 2004. — 664 с.
5. *Печенкин В. В.* Прикладные аспекты использования алгоритмов ранжирования для ориентированных взвешенных графов (на примере графов социальных сетей) / В. В. Печенкин [и др.] // Труды СПИИРАН. — 2018. — № 6 (61). — С. 4. DOI: 10.15622/sp.61.4.
6. *Ивакин Ян А.* Проверка гипотез исторического исследования на базе геохронологического трекинга / Ян А. Ивакин, С. Н. Потапычев, В. Я. Ивакин // Историческая информатика. — 2018. — № 1 (23). — С. 86–93. DOI: 10.7256/2585-7797.2018.1.25344.
7. *Воротников В. И.* Метод линеаризующей обратной связи в задаче управления по части переменных при неконтролируемых помехах / В. И. Воротников, А. В. Вохмянина // Труды СПИИРАН. — 2018. — № 6 (61). — С.3. DOI: 10.15622/sp.61.3.
8. *Дюваль П. М.* Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска / П. М. Дюваль, С. Матиас, Э. Гловер. — СПб.: Символ, 2016. — 240 с.
9. *Курейчик В. В.* Муравьиный алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией / В. В. Курейчик, М. А. Жиленков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. — 2015. — № 2 (22). — С. 10–12.

10. Ajwani D. Average-Case Analysis of Incremental Topological Ordering / D. Ajwani, T. Friedrich // *Discrete Applied Mathematics*. — 2010. — Vol. 158. — Is. 4. — Pp. 240–250. DOI: 10.1016/j.dam.2009.07.006.
11. Ammar A. B. Query optimization techniques in graph Databases // *International Journal of Database Management Systems (IJDMSS)*. — 2016. — Vol. 8. — No. 4. DOI: 10.5121/ijdmss.2016.8401
12. Sarma A. D. Fast distributed pagerank computation / A.D. Sarma et al // *International Conference on Distributed Computing and Networking*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. — Pp. 11–26. DOI: 10.1007/978-3-642-35668-1_2.
13. Иванов Д. А. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий индустрии 4.0 / Д. А. Иванов, М. А. Иванова, Б. В. Соколов // *Труды СПИИРАН*. — 2018. — № 5 (60). — С. 97–127. DOI: 10.15622/sp.60.4.
14. Dobrowski J. Real-time Web-based GIS for Analysis, Visualization, and Integration of Marine Transport Environment Data / J. Dobrowski et al // *Information Fusion and Geographic Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. — Pp. 277–288. DOI: 10.1007/978-3-642-00304-2_19.
15. Codescu M. DO-ROAM: Activity-Oriented Search and Navigation with OpenStreetMap / M. Codescu et al // *International Conference on GeoSpatial Semantics*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — Pp. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6_6.
16. Мичурин С. В. Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта / С. В. Мичурин, Я. А. Ивакин // *Информационно-управляющие системы*. — 2016. — № 4 (83). — С. 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
17. Ивакин Я. А. Иерархия показателей оценки качества программно-аппаратных комплексов центров обработки и хранения данных / Я. А. Ивакин [и др.] // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия I: Естественные и технические науки*. — 2017. — № 5. — С. 65–68.

REFERENCES

1. Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapychev. “Information technology of geochronological tracking for hypotheses testing in research of ship use.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
2. Ivakin, Yan A., and Sergey N. Potapychev. “Geochronology tracking - specialized GIS-tool for history researches.” *Istoricheskaya informatika. Informatsionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyakh i obrazovanii* 1-2 (15-16) (2016): 3–11.
3. Nechepurenko, M. I., V. K. Popkov, S. M. Mainagashev, S. B. Kaul', V. A. Proskuryakov, V. A. Kokhov, and A. B. Gryzunov. *Algoritmy i programmy resheniya zadach na grafakh i setyakh*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otdnie, 1990.
4. Zykov, A. A. *Osnovy teorii grafov*. M: Vuzovskaya kniga, 2004.
5. Pechenkin, Vitaly Vladimirovich, Mikhail Sergeevich Korolev, and Lyubomir Vankov Dimitrov. “Applied aspects of ranking algorithms for oriented weighted graphs (on the example of social network graphs).” *SPIIRAS Proceedings* 6(61) (2018): 4. DOI: 10.15622/sp.61.4.
6. Ivakin, Yan. A., S. N. Potapychev, and V. Ya. Ivakin. “Proverka gipotez istoricheskogo issledovaniya na baze geokhronologicheskogo trekinga.” *Istoricheskaya informatika* 1(23) (2018): 86–93. DOI: 10.7256/2585-7797.2018.1.25344.
7. Vorotnikov, Vladimir Il'ich, and Anastasiya Vladimirovna Vokhmyanina. “Feedback linearization method for problem of control of a part of variables in uncontrolled disturbances.” *SPIIRAS Proceedings* 6(61) (2018): 3. DOI: 10.15622/sp.61.3.
8. Dyugal', P. M., S. Matias, and E. Glover. *Nepriyemlymaya integratsiya. Uluchshenie kachestva programmnogo obespecheniya i snizhenie riska*. SPb.: Simvol, 2016.
9. Kureichik, Vladimir Victorovich, and Mikhail Aleksandrovich Zhilenkov. “ANT COLONY algorithms for solving optimization problems with the explicit objective function.” *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* 2(22) (2015): 10–21.
10. Ajwani, Deepak, and Tobias Friedrich. “Average-case analysis of incremental topological ordering.” *Discrete Applied Mathematics* 158.4 (2010): 240–250. DOI: 10.1016/j.dam.2009.07.006.
11. Ammar, Ali Ben. “Query optimization techniques in graph Databases.” *International Journal of Database Management Systems (IJDMSS)* 8.4 (2016). DOI: 10.5121/ijdmss.2016.8401.

12. Sarma, Atish Das, Anisur Rahaman Molla, Gopal Pandurangan, and Eli Upfal. “Fast distributed pagerank computation.” *International Conference on Distributed Computing and Networking*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 11–26. DOI: 10.1007/978-3-642-35668-1_2.

13. Ivanov, Dmitry Alexandrovich, Marina Alexandrovna Ivanova, and Boris Vladimirovich Sokolov. “Analysis of transformation trends in enterprise management principles in the era of industry 4.0 technology.” *SPIIRAS Proceedings* 5(60) (2018): 97–127.

14. Dąbrowski, Jacek, Marcin Kulawiak, Marek Moszyński, Krzysztof Bruniecki, Łukasz Kamiński, Andrzej Chybicki, and Andrzej Stepnowski. “Real-time web-based GIS for analysis, visualization and integration of marine environment data.” *Information Fusion and Geographic Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. 277–288. DOI: 10.1007/978-3-642-00304-2_19.

15. Codescu, Mihai, Gregor Horsinka, Oliver Kutz, Till Mossakowski, and Rafaela Rau. “DO-ROAM: Activity-oriented search and navigation with OpenStreetMap.” *International Conference on GeoSpatial Semantics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6_6.

16. Michurin, S. V., and Ya. A. Ivakin. “The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes.” *Information and Control Systems* 4(83) (2016): 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.

17. Ivakin, Ya. A., E. G. Semenova, S. A. Morozov, and M. G. Smirnova. “Hierarchy of indicators for assessing the quality of software and hardware complexes of data processing and storage centers.” *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science* 5 (2017): 65–68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ивакин Ян Альбертович —

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46
e-mail: ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич —

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 39
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46
e-mail: potapychev@mail.ru

Ивакин Роман Янович —

инженер-исследователь НИИ «Технологии связи»
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича
193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1
e-mail: romanivakin2018@yandex.ru

Ivakin, Yan A. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226, Russian Federation
e-mail: ivakin@oogis.ru

Potapychev, Sergei N. —

PhD,
senior researcher
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
Concern OCEANPRIBOR JSC
46 Chekalovskiy Av., St. Petersburg, 198226, Russian Federation
e-mail: potapychev@mail.ru

Ivakin, Roman Ya. —

Engineer-Researcher of SRI “Technologies of Telecommunication”
The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications
22/1 Bolshevnikov Av., St. Petersburg, 193232, Russian Federation
e-mail: romanivakin2018@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21 января 2019 г.
Received: January 21, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-461-473

REVISION OF THE ADDITIONAL OPERATIONAL RESTRICTIONS OF THE RUSSIAN RIVER REGISTER FOR THE PASSENGER VESSELS OF «M-SP4.5» CLASS

I. S. Onishchenko¹, V. A. Rychko²

¹ — JSC “CNIIMF”, St. Petersburg, Russian Federation

² — LTD “Forss Technology”, St Petersburg, Russian Federation

The additional restrictions imposed on the passenger vessels of mixed navigation which are under the supervision of the Russian River Register (RRR) made such vessels unattractive for designers and shipowners. The RRR was tasked with improving the competitiveness of the passenger vessels of mixed navigation among other classification societies. The efficiency of additional operational restrictions, regulated by the previously existing rules of the RRR 2015 for the passenger vessels of the mixed (river-sea) navigation relating to the vessels of the “M-SP4,5” class is analyzed in the paper. The operation conditions of such vessels in the Baltic, Black and Caspian seas are considered. Calculations for year-round navigation and for the most difficult month according to wind-wave characteristics are given. The possibility of navigation of “M-SP4.5” class vessels in the Black and Caspian Seas by optimal routes, the distance from shelters on which may exceed 100 miles is taken into account. The inapplicability of restrictions on the permissible distance from the shelters for the passenger ships of “M-SP4.5” class is shown. For passenger vessels of mixed navigation of all classes are proposed to refuse of the additional wave restriction applied for the vessels of 30 m long and less. A quantitative assessment of the efficiency of reducing the allowable height of the wave $h_{3\%}$ per level of the navigation safety of the passenger vessels of “M-SP4,5” class is made. Such a restriction is due to the desire to exclude the possibility of a passenger vessel hit on wave that exceeds the established limit. An alternative restriction for such vessels is proposed, subject to the cancellation of others restrictions. The analysis results are taken into account in the current RRR Rules.

Keywords: Rules of the Russian River Register, passenger vessels, vessels of mixed navigation, “M-SP4,5” class.

For citation:

Onishchenko, Irina S., and Valentin A. Rychko. “Revision of the additional operational restrictions of the Russian River Register for the passenger vessels of “M-SP4.5” class.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 461–473. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-461-473.

УДК 656.6.08; 629.12.004

УТОЧНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ РОССИЙСКОГО РЕЧНОГО РЕГИСТРА ДЛЯ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ КЛАССА «М-СП 4,5»

И. С. Онищенко¹, В. А. Рычко²

¹ — АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Форсс Технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены дополнительные ограничения, предъявляемые к пассажирским судам смешанного плавания, находящихся под наблюдением Российского Речного Регистра, которые делали такие суда не-привлекательными для проектантов и судовладельцев. Изучен вопрос повышения конкурентоспособности пассажирских судов река – море плавания среди других классификационных обществ. В статье исследована эффективность применения дополнительных эксплуатационных ограничений, регламентированных ранее действующими Правилами Российского Речного Регистра 2015 г. для пассажирских судов смешанного (река – море) плавания применительно к судам класса «М-СП 4,5». Рассмотрены условия эксплуатации таких судов в Балтийском, Черном и Каспийском морях. Расчеты приведены для круглогодичного плавания и для наиболее тяжелого по ветроволновым характеристикам месяца. Учтена возможность плавания

судов класса «М-СП 4,5» в Черном и Каспийском морях оптимальными маршрутами, удаление от мест убежища на которых может превышать 100 миль. Показана неприменимость для пассажирских судов класса «М-СП 4,5» ограничений по допустимому удалению от мест убежищ. Для пассажирских судов смешанного плавания всех классов предложено отказаться от дополнительного ограничения по волнению, применяемого для судов длиной 30 м и менее. Выполнена количественная оценка эффективности снижения допускаемой высоты волны трехпроцентной обеспеченности на уровень безопасности плавания пассажирских судов класса «М-СП 4,5». Такое ограничение обусловлено желанием исключить возможность попадания пассажирского судна на волнение, превышающее установленное ограничение. Предложен альтернативный вариант ограничений для таких судов при условии отмены прочих. Результаты выполненного анализа учтены в действующих Правилах Российского Речного Регистра редакции 2019 г.

Ключевые слова: Правила РРР, пассажирские суда, суда смешанного плавания, класс «М-СП 4,5».

Для цитирования:

Онищенко И. С. Уточнение дополнительных эксплуатационных ограничений Российского Речного Регистра для пассажирских судов класса «М-СП 4,5» / И. С. Онищенко, В. А. Рычко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 461–473. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-461-473.

Введение (Introduction)

Стратегия развития туризма в России, утвержденная Приказом¹ на период 2014–2020 гг., оказала влияние на рост интереса к пассажирским судам. Особенно привлекательными для судовладельцев и проектантов являются пассажирские суда смешанного плавания (далее — ССП), эксплуатация которых возможна также в прибрежных морских районах, где расположено много объектов, представляющих интерес для туристов (Соловецкие острова, порты Крымского полуострова, Выборг, Дербент и др.).

Ситуация, сложившаяся в нормативной базе Российского Речного Регистра (далее — РРР), была такова, что эксплуатация таких судов стала невозможной после введения Межведомственного протокола 1992 г.², когда при согласовании возможности выхода пассажирских ССП, находящихся под надзором РРР, в морские районы Российским морским регистром судоходства (далее — РМРС) было установлено требование по обеспечению остойчивости, непотопляемости, конструктивной противопожарной защиты и ряду других позиций в соответствии с существующими Правилами. В 2000-х гг. были изменены Кодекс торгового мореплавания³ и Кодекс внутреннего водного транспорта⁴, после чего РРР получил право определения эксплуатации судов в морских районах без согласования с РМРС.

Уровень безопасности, предъявляемый к пассажирским судам, всегда был завышен по сравнению с судами прочих назначений. Однако в течение длительного времени исследований в части надежности пассажирских ССП не проводилось. Потребность в выполнении таких работ появилась у РРР в связи с изменением нормативных документов^{3, 4}, вследствие чего АО «ИЦС» в 2005 г. была выполнена работа [1]. Так, в Правилах РРР 2008 г.⁵ появилась ссылка на документ «Условия эксплуатации в море пассажирских судов», который в нормативной базе РРР фактически отсутствовал. Таким образом, вопрос допуска таких судов в морские районы так и не был решен.

В редакции Правил РРР 2015г.⁶ были учтены предложения АО «ИЦС» [1], однако появились и другие нововведения, касавшиеся требований к новому классу судов смешанного плавания «М-СП 4,5». При этом дополнительные эксплуатационные ограничения, регламентируе-

¹ Стратегия развития туризма в Российской Федерации на период до 2020 года. М.: Министерство культуры Российской Федерации, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.russiatourism.ru/news/3053/> (дата обращения: 21.04.2019).

² Протокол по установлению условий плавания в море судов с классом Речного Регистра (Протокол-92), 1992.

³ Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30 апреля 1999 г. № 81-ФЗ (ред. от 27.12.2018). 15 с.

⁴ Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 N 24-ФЗ (ред. от 29.12.2017), 2001.

⁵ Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов смешанного плавания Т. 4 – М: Российский Речной Регистр, 2008. Ч. I. Прил. 1 п. 5. С. 134–139.

⁶ Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов в эксплуатации: в ч. 0-VII. М: Российский Речной Регистр, 2015. Ч. 0-II. 977 с.

мые⁶ для пассажирских судов, были формально распространены на суда этого назначения класса «М-СП 4,5», хотя в исследовании [1] специфические условия эксплуатации судов класса «М-СП 4,5» не рассматривались.

Следует отметить, что указанные ограничения делают пассажирские ССП, находящиеся под наблюдением РРР, непривлекательными для проектантов и судовладельцев: судно большую часть навигации ожидает «окна» погоды. После введения в Правила РРР требований к судам класса «М-СП 4,5» у РРР появилась задача повышения конкурентоспособности таких судов, которая стала возможной путем согласования существующих ограничений. Таким образом, была выявлена необходимость проведения анализа эффективности применяемых для пассажирских ССП дополнительных эксплуатационных ограничений относительно класса «М-СП 4,5».

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве эталона для судов класса «М-СП 4,5» послужили суда класса «М-СП 3,5», которые имеют длительный, и в целом положительный опыт эксплуатации. Сопоставление условий плавания судов класса «М-СП 4,5» и «М-СП 3,5» выполнено в табл. 1.

Таблица 1

Отличия введенных Правилами РРР¹ ограничений для судов классов «М-СП4,5» и «М-СП3,5»

Параметр	«М-СП 4,5»	«М-СП 3,5»
Допускаемый режим волнения при высотах волн [$h_{3\%}$], м, не более	4,5	3,5
География районов плавания	Границы не определены. Используются термины «закрытые» и «открытые» моря	Границы подробно описаны п. 7 ч. 0 ПКПС
Ограничения по сезонам эксплуатации	Отсутствуют. Предусмотрена круглогодичная навигация	Подробное описание сезонов в п. 7 ч. 0 ПКПС
Допускаемое удаление от убежищ	Для «закрытых» — 100 миль, Для «открытых» морей — 50 миль	Не нормировано в явном виде

Столь значительные различия в допустимых условиях плавания судов классов «М-СП 3,5» и «М-СП 4,5» потребовали проведения анализа целесообразности применения дополнительных эксплуатационных ограничений, регламентированных Правилами РРР¹ для пассажирских ССП, к судам этого назначения класса «М-СП 4,5». Результаты этого анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Анализ применимости к судам класса «М-СП 4,5» дополнительных эксплуатационных ограничений, предъявляемых к пассажирским ССП

Ограничение по п. 7.4 ч. 0 «Классификация» ПКПС ²	Применимость	Пояснение
«К эксплуатации в море допускаются самоходные водоизмещающие судов пассажирские суда, у которых значение допускаемой высоты волны $h_{3\%}$ в формуле класса равно нормативному, соответствующему основному символу класса»	Не актуально	Допуск в морские районы «неполноклассных» судов был запрещен Правилами РРР

¹ Российский речной регистр. Правила классификации и постройки судов в эксплуатации: в 0-VII ч. М: Российский Речной Регистр, 2015. Ч. 0-VII. 977 с.

² Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов в эксплуатации // Российский Речной Регистр М., 2015. URL: <https://www.rivreg.ru/docs/pravila2015/> (дата обращения 20.11.18). С. 410.

<p>«Допустимое расстояние между местами убежищ, обеспечивающими возможность входа и стоянки судна при ветре всех направлений, не должно превышать расстояния, которое судно проходит за 12 часов на тихой воде при скорости хода, составляющей 70 % от номинальной»</p>	<p>Применение нецелесообразно</p>	<p>Ограничение, не зависящее от класса, не позволяет реализовать регламентированное расстояние между местами убежищ до 200 миль при фактических скоростях хода на тихой воде существующих и проектируемых пассажирских ССП класса «М-СП 4,5». График, отображающий зависимость такого расстояния S_{\max} от скорости хода на тихой воде V_0, приведен в рис. 1.</p>
<p>«Для водоизмещающих судов длиной 30 м и менее прогнозная высота волны, независимо от класса, не может превышать величину $0,2L^{0,75}$, где L — габаритная длина судна в м»</p>	<p>Не обоснованно</p>	<p>При графическом отображении зависимости допускаемой высоты волны от длин судов (см. рис. 2) происходит скачок кривой с 4,5 м до 2,56 м при $L = 30$ м, который является труднообъяснимым в физическом смысле. Данное требование вводилось по аналогии с Правилами РМРС, в которых это ограничение распространялось на суда всех типов и назначений, эксплуатируемых в условиях перегона. В действующих Правилах РМРС данное требование отсутствует.</p>

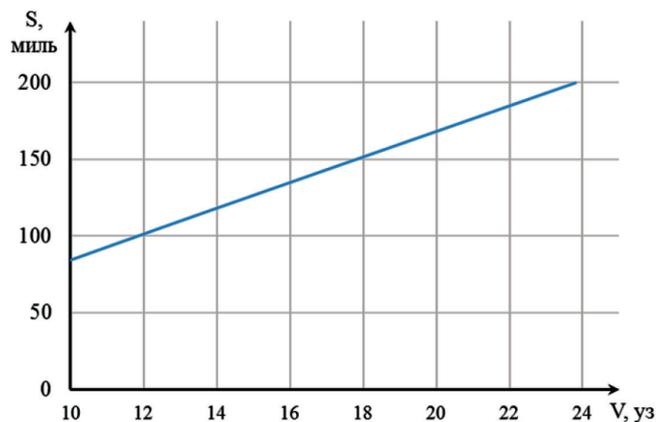


Рис. 1. График зависимости допускаемого расстояния между местами убежищ S_{\max} от скорости хода на тихой воде V_0 для «закрытых» морей

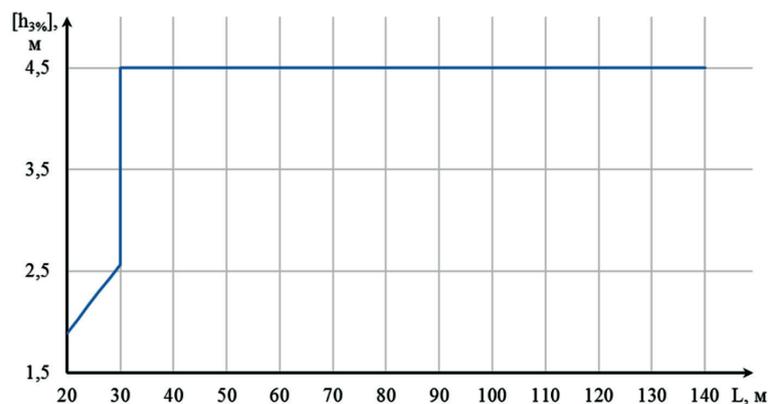


Рис. 2. Зависимость допускаемой высоты волны $h_{3\%}$ от длины пассажирского судна класса «М-СП 4,5»

В п. 7.4 ч. 0 ПКПС Правил РРР¹ существует еще одно ограничение: «выход пассажирского судна из места убежища (порта) на трассу плавания допускается в случае, если в прогнозе погоды на последующие 12 часов высота волны 3%-й обеспеченности не превышает величины $h_{3\%}$, уменьшенной на 0,5 м». Введение подобных ограничений по расстоянию между местами убежищ и по допускаемой высоте волны предполагало полное исключение или минимизацию возможности попадания судна на фактическое ограничение режима волнения $h_{3\%}$, нормированное для класса. Использованный подход вызывает сомнения, что отмечалось в работе [2].

Для оценки эффективности рассматриваемых дополнительных эксплуатационных ограничений были выполнены соответствующие расчеты применительно к пассажирским судам класса «М-СП 4,5» на примере условий плавания в акваториях Балтийского, Каспийского и Черного морей. Уровень безопасности эксплуатации таких судов оценивался отношением обеспеченностей волновых нагрузок при заданных режимах волнения на рассматриваемой акватории, для удобства оценки которого были введены коэффициенты m и n :

$$m = \lg Q^*(M_{дв} | [h_{3\%}]_{огр}) / \lg Q^*(M_{дв} | [h_{3\%}]); \quad (1)$$

$$n = \lg Q^*(r | [h_{3\%}]_{огр}) / \lg Q^*(r | [h_{3\%}]), \quad (2)$$

где $[h_{3\%}]_{огр}$ — допустимая высота волны, варьируемая в интервале [2,0; 4,5];

$[h_{3\%}] = 4,5$ м — регламентированное Правилами РРР 2015 г. ограничение по режиму волнения для судов класса «М-СП 4,5»;

$M_{дв}$ — регламентированная Правилами РРР 2015 г. для судов класса «М-СП 4,5» величина дополнительного волнового изгибающего момента²;

r — регламентированная Правилами РРР 2015 г. для судов класса «М-СП 4,5» величина расчетной полувысоты волны;

$Q^*(M_{дв} | [h_{3\%}])$ и $Q^*(M_{дв} | [h_{3\%}]_{огр})$ — определяемые по алгоритму, описанному в источнике [3], обеспеченности общих волновых нагрузок в рассматриваемых условиях эксплуатации при ограничениях по волнению $[h_{3\%}]$ и $[h_{3\%}]_{огр}$;

$Q^*(r | [h_{3\%}])$ и $Q^*(r | [h_{3\%}]_{огр})$ — определяемые по алгоритму, описанному в источнике [3], обеспеченности местных волновых нагрузок в рассматриваемых условиях эксплуатации при ограничениях по волнению $[h_{3\%}]$ и $[h_{3\%}]_{огр}$.

Указанные величины вероятностей превышения $Q^*(X)$ общих и местных волновых нагрузок определены с учетом использования разработанного АО «ЦНИИМФ» подхода, подробно описанного в работах [4] и [5].

Результаты (Results)

Оценка обеспеченностей волновых нагрузок определялась с учетом следующих основных факторов, традиционно учитываемых при оценке уровня безопасности эксплуатации ССП в морских районах по критериям общей и местной прочности:

1. Расстояние между местами убежищ, выбранное с учетом направлений развития волнения;
2. Вероятности превышения рассматриваемых режимов волнения, зависящие от долгосрочных ветроволновых характеристик, полученных с учетом использования современных справочных данных РМРС [6], [7].

Значения указанных параметров приведены в табл. 3 и 4 для Черного³ и Каспийского морей, характеризуемых удалением от мест убежищ, превышающим нормируемыми Правилами

¹ Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов в эксплуатации // Российский Речной Регистр. М., 2015. URL: <https://www.rivreg.ru/docs/pravila2015/> (дата обращения 20.11.18). 410 с.

² Применительно к условиям эксплуатации судов в Среднем Каспии произвольными маршрутами использованы результаты расчетов [2] по увеличению величин $M_{дв}$ по сравнению со значениями, регламентированными редакцией Правилами РРР 2015 г.

³ Приведены максимальные расстояния только из портов России до пролива Босфор.

ми 100 мильми соответственно. В северной части Каспия расстояния между местами убежищ не превышают 200 миль, в связи с чем данный район не приводится в табл. 4. В Балтийском море, принятом в качестве эталона, такие расстояния не превышают нормативных значений ($S_{\max} \leq 180$ миль).

Таблица 3

Максимальное расстояние между местами убежищ на трассах между российскими морскими портами и проливом Босфор в Черном море

Направления трасс в Черном море	Максимальное расстояние между местами убежищ S_{\max} , мили
п. Евпатория – прол. Босфор	226
п. Севастополь – прол. Босфор	216
Керченский пролив и п. Ялта – прол. Босфор	210
п. Новороссийск – прол. Босфор	212
п. Сочи – прол. Босфор	218

Таблица 4

Максимальное фактическое расстояние между местами убежищ в Каспии, мили, и обеспеченности режимов волнения $h_{3\%} > [h_{3\%}]$, %

Направление развития волнения	Средний Каспий			Южный Каспий		
	S_{\max} , мили	$P\{h_{3\%} > [h_{3\%}]\}$ круглый год	$P\{h_{3\%} > [h_{3\%}]\}$ тяжелый месяц	S_{\max} , мили	$P\{h_{3\%} > [h_{3\%}]\}$ круглый год	$P\{h_{3\%} > [h_{3\%}]\}$ тяжелый месяц
Север	242	0,174	0,069	280	0,393	0,099
Северо-восток	270	0,347	0,378	280		
Восток	270			0,291	0,383	≤ 200
Юго-восток	246	≤ 200				
Юг	232	≤ 200				
Юго-запад	232	0,08	0,093	≤ 200	0,041	0,023
Запад	232			≤ 200		
Северо-запад	236	0,108	0,077	240		

Примечание. $P\{h_{3\%} > [h_{3\%}]\}$ — вероятность превышения фактическим волнением $h_{3\%}$ допустимого для судов класса «М-СП4,5» ограничения по волнению $[h_{3\%}] = 4,5$ м.

Были выполнены расчеты коэффициентов m — по формуле (1) и n — по формуле (2), результаты которых представлены в виде зависимостей m ($[h_{3\%}]$) и n ($[h_{3\%}]$) для общей и местной прочности, соответственно, при условиях круглогодичного плавания (рис. 3 и 4) и эксплуатации в наиболее тяжелый по ветроволновым характеристикам месяц (рис. 5 и 6). При этом на рисунках были приняты следующие обозначения:

- Б — центральная часть Балтийского моря при удалении судна от мест убежища до 100 миль¹;
- С1 — Средний Каспий при удалении от мест убежища до 100 миль;
- С2 — Средний Каспий при плавании произвольными маршрутами при удалении от мест убежища свыше 100 миль (см. табл. 4);
- Ч1 — центральная часть Черного моря при удалении от мест убежища до 100 миль;
- Ч2 — Черное море при плавании из российских черноморских портов до пролива Босфор кратчайшими маршрутами (удаление от мест убежища до 113 миль [8]).

¹ Значение задано условно, так как удаление от мест убежищ в Балтике для судов класса «М-СП 4,5» не превышает нормируемых Правилами РРР для «закрытых» морей значений.

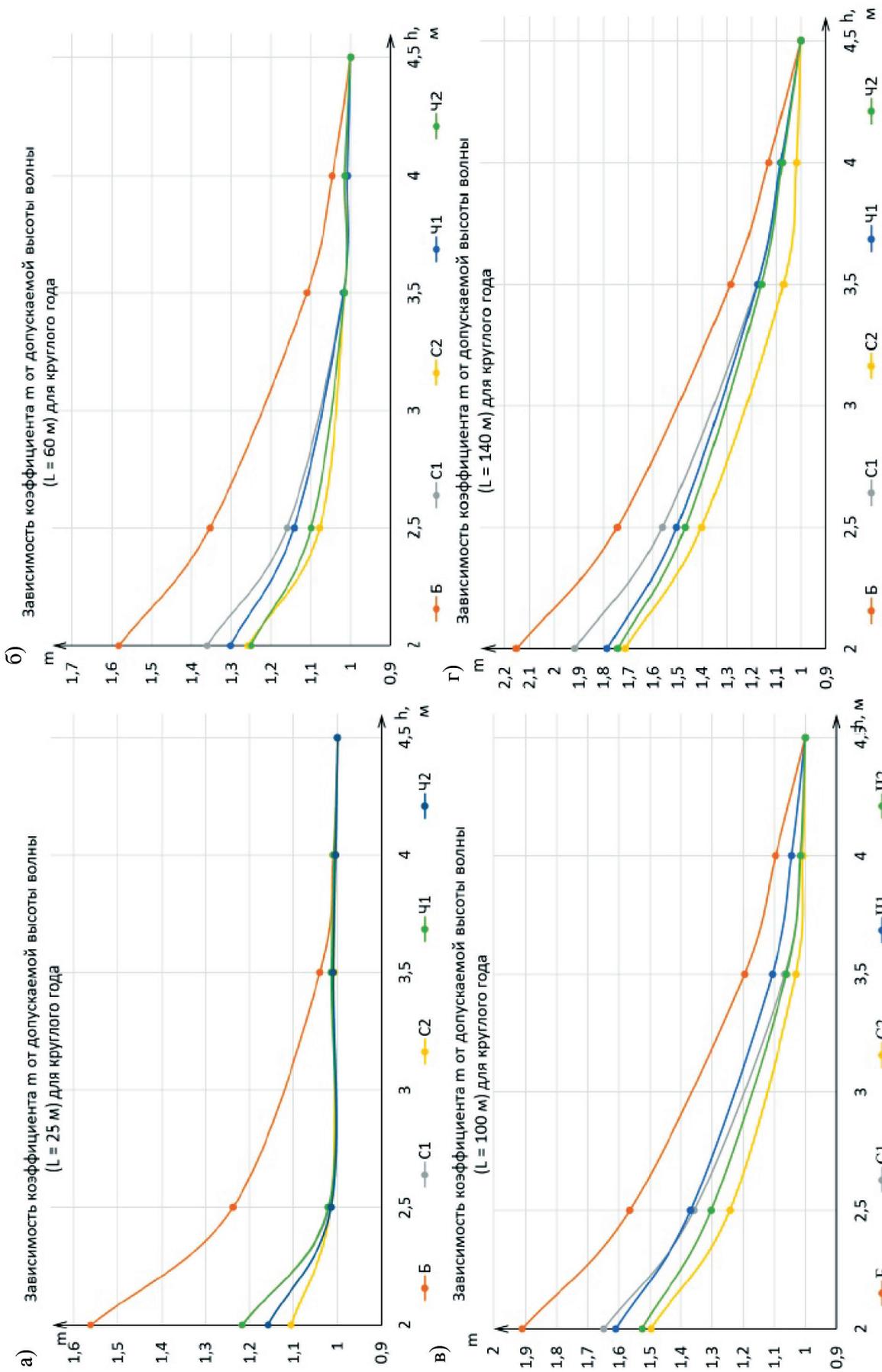


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента m (общая прочность) от допускаемого ограничения по волнению при условии круглогодичного плавания судов характерных длин: а — для $L = 25$ м; б — для $L = 100$ м; в — для $L = 60$ м; г — для $L = 140$ м

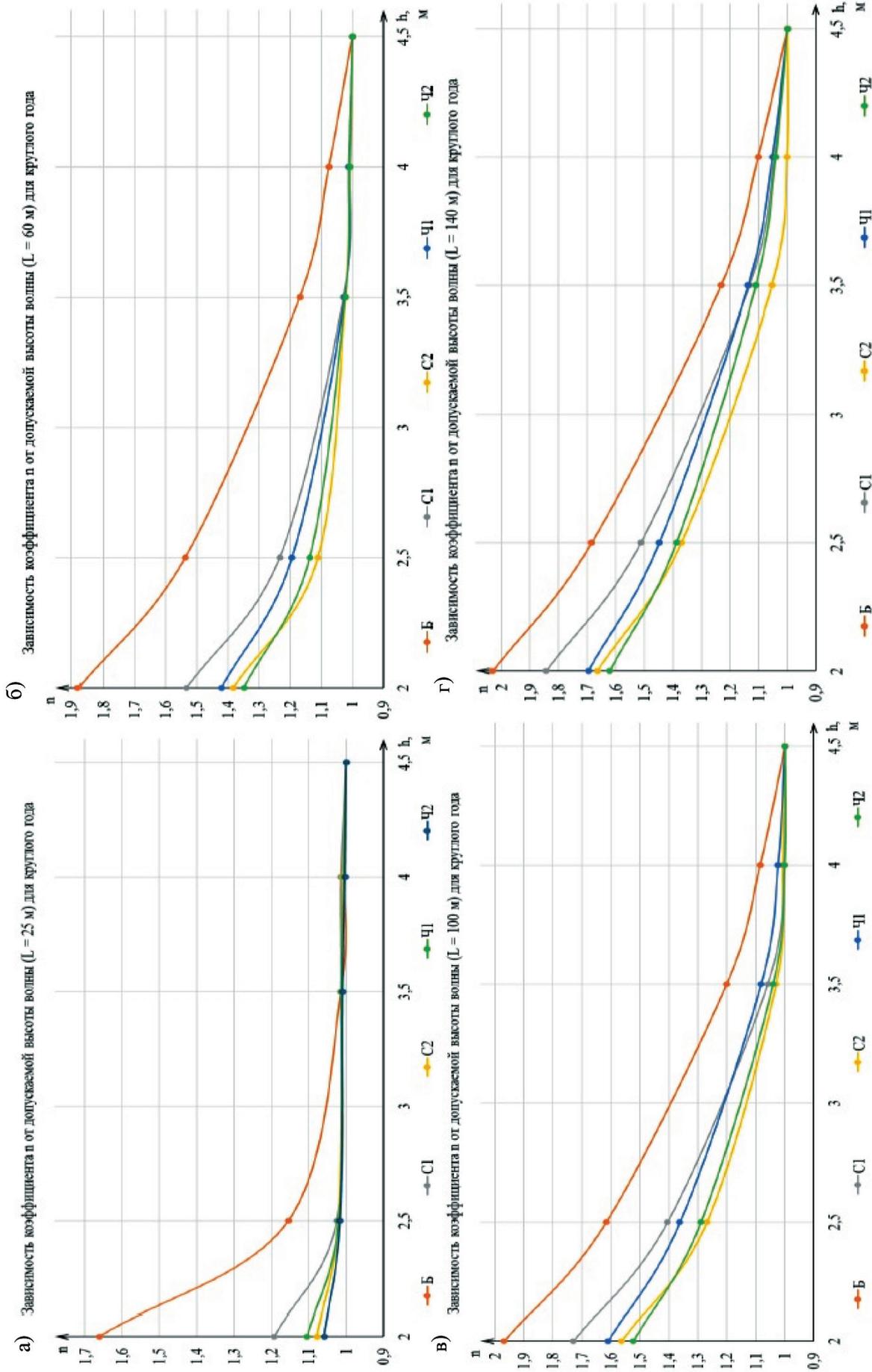


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента n (местная прочность) от допустимого ограничения по волнению при условии круглогодичного плавания судов характерных длин: а — для $L = 25$ м; б — для $L = 60$ м; в — для $L = 100$ м; г — для $L = 140$ м

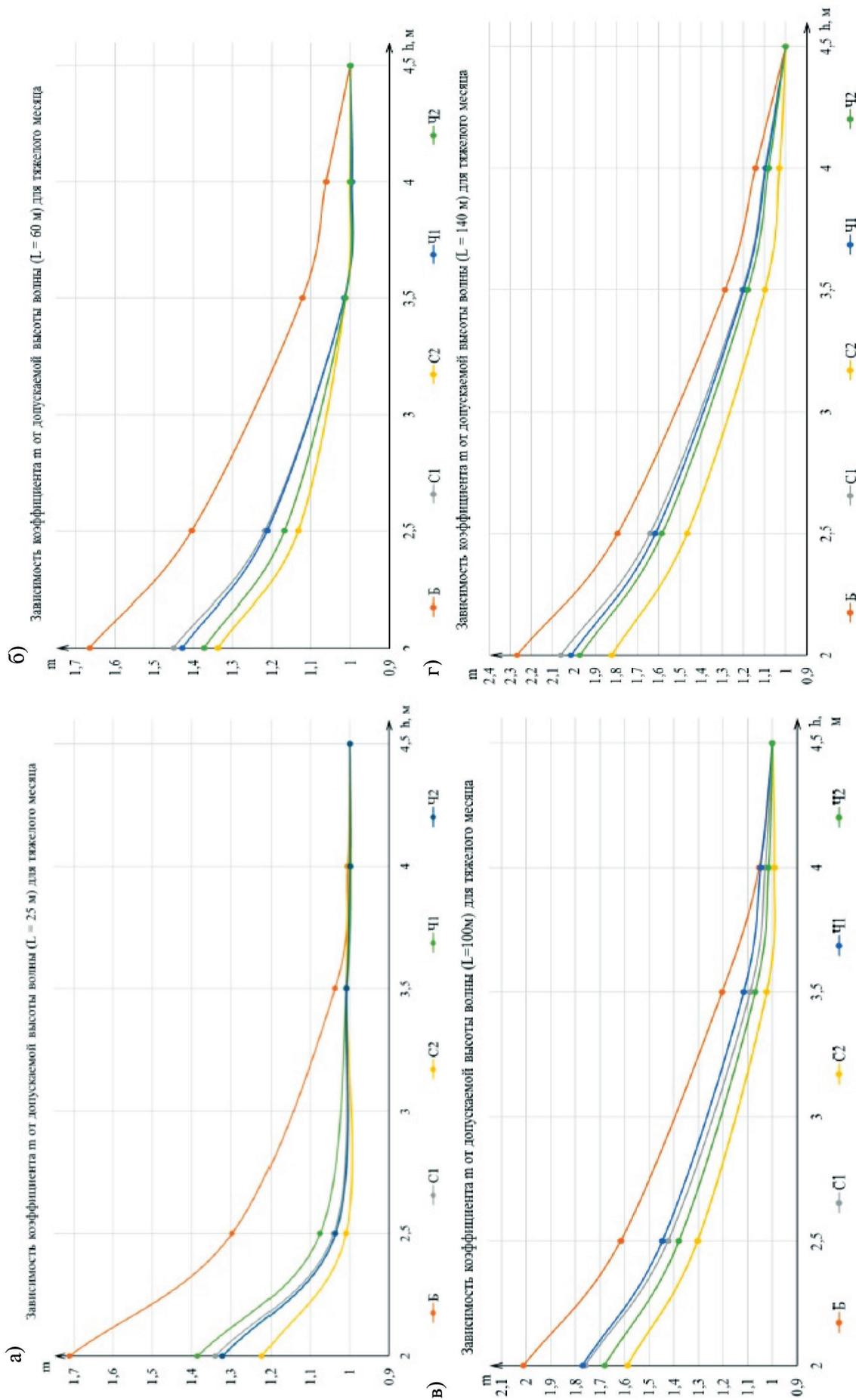


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента m (общая прочность) от допустимого ограничения по волнению при условии эксплуатации в наиболее тяжелый месяц судов характерных длин: a — для $L = 25$ м; $б$ — для $L = 60$ м; $в$ — для $L = 100$ м; $г$ — для $L = 140$ м

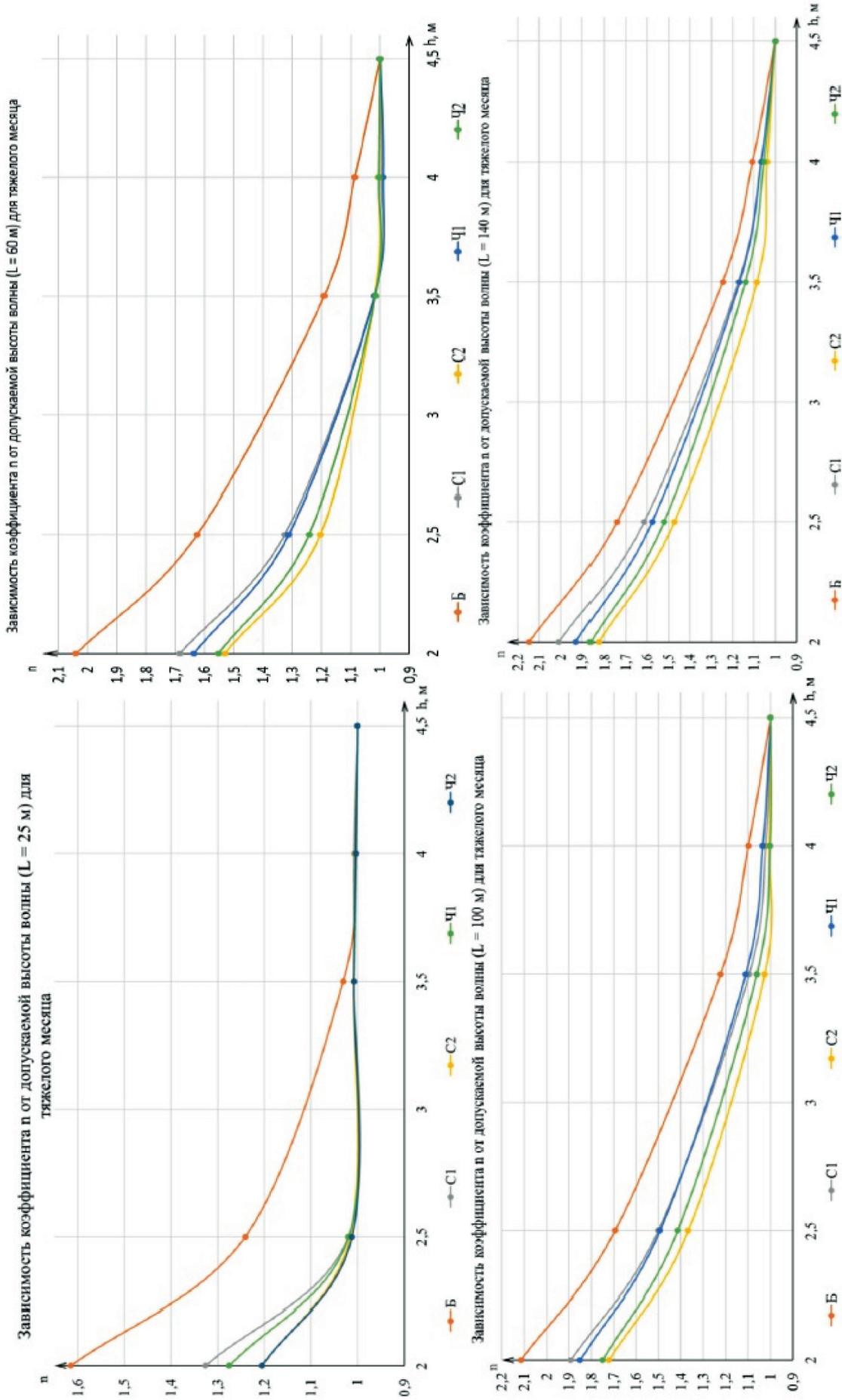


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента n (местная прочность) от допускаемого ограничения по волнению при условии эксплуатации в наиболее тяжелый месяц судов характерных длин: a — для $L = 25$ м; $б$ — для $L = 60$ м; $в$ — для $L = 100$ м; $г$ — для $L = 140$ м

В результате выполненного анализа были выявлены следующие закономерности, представленные в статье [3]:

– наибольшее и, тем не менее, относительное влияние на обеспеченность общих и местных волновых нагрузок было получено для условий плавания на Балтике, характеризующихся наиболее жесткими волновыми характеристиками;

– для остальных рассматриваемых районов эксплуатации эффективность от введения дополнительного ограничения по волнению снижается с уменьшением длины судна;

– снижение допускаемой высоты волны с $[h_{3\%}] \leq 4,5$ м до $[h_{3\%}]_{огр} \leq 4,0$ м не оказывает значимого влияния на обеспеченность волновых нагрузок,

– по мере увеличения расстояния между местами убежищ эффективность данного ограничения снижается.

Таким образом, выполненный для судов класса «М-СП 4,5» анализ применимости дополнительных эксплуатационных ограничений показал либо их незначительное влияние, либо полную неприменимость для пассажирских ССП. В качестве альтернативы имеющимся требованиям п. 7.4 ч. 0 ПКПС для пассажирских судов класса «М-СП 4,5» был предложен подход [3], основанный на использовании двухсуточного прогноза волнения при принятии решения о выходе судна из места убежища или порта. По мере развития методов определения прогнозов ветрового волнения число таких дней может быть увеличено.

Ранее качественная оценка применимости рассматриваемых ограничений была выполнена в работах АО «ЦНИИМФ», однако лишь данное исследование представило количественную оценку, позволившую РРР внести соответствующие изменения в Правила 2019 г.¹:

– отменено ограничение по допустимой высоте волны для пассажирских судов всех классов длиной 30 м и менее;

– разрешено использование двухсуточного прогноза волнения при принятии решения о выходе судна из места убежища для пассажирских ССП класса «М-СП 4,5» при условии отказа от прочих дополнительных эксплуатационных ограничений, предписанных п. 7.4 ч. 0 «Классификация» ПКПС.

Заключение (Conclusion)

В результате выполненного анализа применимости для судов класса «М-СП 4,5» дополнительных эксплуатационных ограничений, регламентированных Правилами РРР, 2015 г. для пассажирских ССП, была показана их неприменимость или малая эффективность и предложен подход, основанный на использовании двухсуточного прогноза волнения при принятии решения о выходе пассажирского судна класса «М-СП 4,5» из места убежища или порта. Применение такого прогноза позволило отказаться от дополнительных ограничений, упомянутых в статье. Подобный подход может быть использован для ряда других морей, а продолжительность прогноза может быть откорректирована по мере уточнения сведений по ветроволновым характеристикам в морях [9]–[11]. Предложения по уточнению Правил были вынесены на научно-технический совет при РРР и учтены в действующей редакции Правил¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификация морских районов для судов смешанного (река-море) плавания, в том числе пассажирских и разъездных. Отчет по договору № Р26/04-5616 от 15.04.2004 г.; Рук. работы О. З. Степанов. — СПб.: ОАО «ИЦС», 2005.

2. Разработка требований и допустимых условий плавания (в том числе и пассажирских) класса «М-СП4,5» Российского Речного Регистра в акватории Каспийского моря: отчет о НИР (промежут. этап 3): 253-Р150/2018-03 / АО «ЦНИИМФ»; Рук. работы Ю. И. Ефименков. — СПб., 2018. — 32 с. — Инв. № 8649 (НТБ АО «ЦНИИМФ»).

3. *Онищенко И. С.* Оценка применимости допускаемых эксплуатационных ограничений, установленных действующими Правилами Российского Речного Регистра к пассажирским судам класса «М-СП4,5» /

¹ Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов. Т. 1. М.: Российский Речной Регистр, 2019. 384 с.

И. С. Онищенко, В. А. Рычко // Материалы ежегодной научно-практической конференции для студентов, магистрантов и аспирантов «Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации», 30 ноября 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 65–72.

4. Гуляев И. А. Принципы формирования требований Правил РРР к судам прибрежного плавания класса «ПР» / И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Речной транспорт (XXI век). — 2017. — № 4 (84). — С. 20–23.

5. Гири́н С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гири́н, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С. 18–26.

6. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. — 214 с.

7. Бухановский А. В. Новое поколение справочников по режиму волнения морей / А. В. Бухановский, Л. И. Лопатухин, Е. С. Чернышева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 50–65.

8. Уточнение допустимых условий эксплуатации и ограничений по типам судов смешанного (рек-море) плавания класса «М-СП 4,5» Российского Речного Регистра в акватории Черного моря: отчет о НИР (промежут.) / АО «ЦНИИМФ»; отв. исполн. Ю. И. Ефименков; № ГР АААА-А17-117072060004-6; Инв. № 8593 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб., 2017. — 28 с.

9. Бухановский А. В. Оценка волнового климата морей по данным о ветре / А. В. Бухановский, Л. И. Лопатухин, Е. С. Чернышева // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 9. — С. 100–107. DOI: 10.3103/S1068373917090096.

10. Лопатухин Л. И. Справочники по волновому климату морей — от традиционных изданий к компьютерным технологиям / Л. И. Лопатухин [и др.] // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сб. тез. Всерос. науч.-практ. конф. — СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. — С. 329–330.

11. Зеленько А. А. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) / А. А. Зеленько, Ю. Д. Реснянский // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 12. — С. 5–30.

REFERENCES

1. *Klassifikatsiya morskikh raionov dlya sudov smeshannogo (reka-more) plavaniya, v tom chisle passazhirskikh i raz'ezdnykh*. Otchet po dogovoru № R26/04-5616 ot 15.04.2004 g. Ruk. raboty Stepanov O. Z. SPb.: OAO «ITsS», 2005.

2. *Razrabotka trebovanii i dopustimykh uslovii plavaniya (v tom chisle i passazhirskikh) klassa «M-SP4,5» Rossiiskogo Rechnogo Registra v akvatorii Kaspiiskogo moray*. Otchet o NIR (promezhutoch. – etap 3). SPb., 2018.

3. Onishchenko, I. S., and V. A. Rychko. “Otsenka primenimosti dopuskaemykh ekspluatatsionnykh ogranichenii, ustanovlennykh deistvuyushchimi Pravilami Rossiiskogo Rechnogo Registra k passazhirskim sudam klassa «M-SP4,5».” *Materialy ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii dlya studentov, magistrantov i aspirantov «Razvitie infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: traditsii, innovatsii», 30 noyabrya 2018 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 65–72.

4. Gulyaev, I. A., and Yu. I. Efimenkov. “Printsipy formirovaniya trebovanii Pravil RRR k sudam pribreznogo plavaniya klassa «PR».” *Rechnoi transport (XXI vek)* 4(84) (2017): 20–23.

5. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu. I. Efimenkov. “General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships.” *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 18–26.

6. *Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiiskogo morei*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2003.

7. Bukhanovskii, A. V., L. I. Lopatukhin, and E. S. Chernysheva. “Novoe pokolenie spravochnikov po rezhimu volneniya morei.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 34 (2011): 50–65.

8. *Utochnenie dopustimykh uslovii ekspluatatsii i ogranichenii po tipam sudov smeshannogo (rek-more) plavaniya klassa «M-SP4,5» Rossiiskogo Rechnogo Registra v akvatorii Chernogo moray*. Otchet o NIR (promezhutoch.). SPb., 2017.

9. Boukhanovsky, A. V., L. I. Lopatoukhin, and E. S. Chernysheva. “Assessment of wave climate of seas from wind data.” *Russian Meteorology and Hydrology* 42.9 (2017): 615–620. DOI: 10.3103/S1068373917090096.

10. Lopatoukhin, L., A. Boukhanovsky, A. Kalyuzhnaya, and E. Chernysheva. "Wave climate handbooks - from traditional publications to high performance computing." *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoichivogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii: Sbornik tezisov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Rossiiskii gosudarstvennyi gidrometeorologicheskii universitet, 2019. 329–330.

11. Zelenko, A. A., and Yu. D. Resnyanskii. "Marine Observational Systems as an Integral Part of Operational Oceanology: A Review." *Russian Meteorology and Hydrology* 12 (2018): 5–30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Онищенко Ирина Станиславовна —

инженер

АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Кавалергардская, 6, лит. А

e-mail: irris291@gmail.com

Рычко Валентин Андреевич —

инженер-конструктор 3-й категории

ООО «Форсс Технологии»

190013, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Бронницкая, 44, лит. А

e-mail: rychval@rambler.ru

Onishchenko, Irina S. —

Engineer

JSC "CNIIMF"

6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

e-mail: irris291@gmail.com

Rychko, Valentin A. —

Design engineer

LTD "Forss Technology"

44A Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,

Russian Federation

e-mail: rychval@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2019 г.

Received: April 23, 2019.

THE INFLUENCE OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE HANDLING EQUIPMENT ELEMENTS ON ENVIRONMENTAL SAFETY AND CAPACITY OF THE COAL TERMINAL

I. V. Zub¹, Yu. E. Ezhov¹, O. V. Schulga²

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

² – Port Logistics Ltd., Vyborg, Leningrad region, Russian Federation

The model of the coal terminal as a system is considered and the physical and management-informational communications between the terminal subsystems are shown in the paper. The model analysis have showed that the probability of failure of such elements as the grab and conveyor belt, would cause the termination of the coal terminal operation and affect the environmental and industrial safety, as well as the coal terminal capacity. The solution of problems on the safe production of works is solved by developing the working technological cards and identifying the regularities of emergency situations occurrence. Each emergency situation is assessed and its impact on the overall safety of the coal terminal is identified. Forecasting and modeling of probable emergencies allows us to determine the ways of their solution. The second important aspect of the coal terminal operation is the technical condition of the grab and conveyor belt and their influence on the environment and capacity reduction. Safe operation depends on the quality of repair work, the availability of the technical documentation and the diagnostic tools, technical measures for the handling equipment maintenance. The handling equipment used at the coal terminal is equipped with both rope and hydraulic grabs. The wear of the grab jaws, or hydraulic cylinders, providing opening/closing of the jaws, leads to loose closure of the grab and consequently the spillages formation. The complexity of the defects timely detection lies in the fact that these elements of the handling equipment are difficult to diagnose, in contrast to the rest of the mechanical equipment. The diagnostic tools considered in the literature allow us to identify the longitudinal breaks of the conveyor belt, the transverse breaks are diagnosed, but the obtained data have a low probability.

Keywords: coal terminal, grab, conveyor belt, technical condition diagnostics, handling equipment.

For citation:

Zub, Igor V., Yurii E. Ezhov, and Olga V. Shulga. "The influence of the technical condition of the handling equipment elements on environmental safety and capacity of the coal terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 474–484. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-474-484.

УДК 656.6; 656.073.23

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

И. В. Зуб¹, Ю. Е. Ежов¹, О. В. Шульга²

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

² — ООО «Порт Логистик», г. Выборг, Ленинградская область, Российская Федерация

Рассмотрена модель угольного терминала как системы, показаны физические и управленческо-информационные связи между подсистемами терминала. Анализ модели показал, что вероятность отказа таких элементов, как грейфер и конвейерная лента, вызовет прекращение функционирования угольного терминала и отразится на экологической и промышленной безопасности, а также пропускной способности угольного терминала. Решение задач по безопасному производству работ реализуется посредством создания рабочих технологических карт и выявления закономерностей возникновения аварийных ситуаций. После оценки каждой аварийной ситуации оценивается и выявляется ее влияние на общий уровень

безопасности угольного терминала. Прогнозирование и моделирование вероятных аварийных ситуаций позволяют определить пути их решения. Отмечается, что важным аспектом эксплуатации угольного терминала является техническое состояние грейфера и конвейерной ленты, оказывающих влияние на экологию окружающей среды и снижение пропускной способности. Безопасное производство работ зависит от качества проведения ремонтных работ, наличия технической документации и средств диагностики, проведения технических мероприятий по техническому обслуживанию перегрузочного оборудования. Применяемое на угольном терминале перегрузочное оборудование оснащается как канатными грейферами, так и гидрофицированными. Износ «челюстей» грейфера или гидравлических цилиндров, обеспечивающих открытие / закрытие «челюстей», приводит к неплотному закрытию грейфера и, как следствие, к образованию просыпей. Сложность своевременного выявления дефектов заключается в том, что данные элементы перегрузочного оборудования трудно диагностируемые, в отличие от остального механического оборудования. Рассмотренные в библиографических источниках средства диагностирования позволяют выявить продольные разрывы конвейерной ленты, поперечные разрывы диагностируются, но полученные данные имеют низкую вероятность.

Ключевые слова: угольный терминал, грейфер, конвейерная лента, диагностика технического состояния, перегрузочное оборудование.

Для цитирования:

Зуб И. В. Влияние технического состояния элементов перегрузочного оборудования на экологическую безопасность и пропускную способность угольного терминала / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, О. В. Шульга // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 474–484. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-474-484.

Введение (Introduction)

На угольных терминалах (УТ) уголь хранится на открытых площадках в штабелях. Все виды угля делятся на три группы: антрациты, бурые, каменные. Каждая группа, в свою очередь, подразделяется на классы (марки). При обработке в порту несколько классов (марок) углей каждый класс хранится в отдельных штабелях. Размеры штабеля не ограничиваются, но, как правило, размеры его основания зависят от применяемого в порту перегрузочного оборудования (ПО) и принятой технологии. В зависимости от группы угля устанавливается высота складирования штабеля. Высота штабеля оказывает влияние как на экологическую, так и на пожарную безопасность. Для углей, способных к самовозгоранию и самонагреванию, высота штабеля ограничена до 8 м. Причиной самонагревания и самовозгорания является циркуляция воздуха внутри штабеля. Для ее устранения выполняется укладка угля с его уплотнением, поверхность штабеля засыпают слоем угля мелкой фракции, который впоследствии утрамбовывается. При формировании штабеля внутрь вставляются металлические трубки, в которые опускаются термометры и затем производится контроль температуры. При длительном хранении происходит выветривание угля, понижается его теплотворная способность.

Измельчение угля на более мелкие фракции ведет к снижению его качества, а также к распыливанию частиц угля, что приводит к загрязнению окружающей среды. Угольная пыль размером от 2 до 100 мкм, поднимается и уносится с открытых складов потоком воздуха. Количество пыли, поднимающейся в воздух во время проведения работ, зависит от физических характеристик угля. Угольная пыль уносится со складов следующим образом:

- воздушным потоком, когда уголь ссыпают в штабель сверху ленточным конвейером;
- ветром с поверхности штабеля при хранении угля;
- во время погрузочно-разгрузочных работ, а именно: поднятия-опускания угля грейфером и его переноса с места хранения на транспортное средство и обратно;
- при перегрузке угля стакером-реклаймером;
- во время передвижения работников и погрузочной техники по угляю.

Работоспособность ПО и применение защитных технических средств обеспечивают защиту окружающей среды от негативного воздействия угольной пыли. Для обеспечения работоспособности ПО проводится его диагностика, что позволяет снизить не только негативное воздействие на внешнюю среду, но и простои транспортных средств (ТС) под обработкой.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе использованы методы анализа библиографических источников и методы моделирования. УТ представляет сложную техническую систему, от работоспособности каждого элемента которой зависит как экологическая и промышленная безопасность, так и пропускная способность (ПС). Технология перегрузочных работ зависит от имеющегося ПО.

При принятии технологических решений необходимо учитывать следующие целевые показатели:

– увеличение ПС:

$$ПС \rightarrow \max; \quad (1)$$

– уменьшении негативного воздействия на экологическую безопасность (ЭБ):

$$ЭБ \rightarrow \min. \quad (2)$$

Решения, при которых соблюдаются целевые условия (1) и (2):

- хранение угля в крытых складах;
- погрузка и хранение угля в контейнерах.

Для соблюдения условия (1) требуются затраты на строительство крытого склада, что приведет к уменьшению объема склада, так как у многих УТ имеется ограничение по площади ($S_{УТ}$):

$$S_{УТ} \rightarrow \text{const}. \quad (3)$$

При этом целевая функция (1) не будет выполняться.

Для соблюдения условия (2) предлагается использование как мягких контейнеров (биг-беги) [1], так и контейнера с крышками [2], предотвращающими пыление угля во время транспортировки. При этом выгрузку можно выполнять следующим образом: снять контейнер с платформы, опустить в трюм и открыв люки, выгрузить уголь. В этом случае портальный кран должен быть соответствующей грузоподъемности, и, кроме того, при использовании на причале судопогрузочной машины этот вариант погрузки судна исключен. При хранении угля предлагается [3] укрывать его специальной сеткой, а для определения пылеуноса разработать модель с использованием коэффициентов подобия, но при этом учитывать технологию погрузочно-разгрузочных работ (ПРР). Наиболее распространенной технологией перегрузки угля принят вариант работы с применением грейферных кранов и перегружателей. При этом способе перегрузки потери груза от просыпи составляют 1,0 ... 2,3 % от грузооборота, а с учетом пылеобразования могут достигать 3 ... 5 %. Источником пыления при данной технологии является грейфер [4]–[6], при использовании специального бункера снижается пыление угля [6].

Для исследования приемлемого технологического решения, при котором будут соблюдены все целевые функции с учетом имеющегося ограничения, применяется имитационное моделирование. На УТ имитационное моделирование затруднено, поскольку прибытие ТС имеет стохастический характер.

Имитационное моделирование УТ выполняется в указанной последовательности:

- декомпозиция технологической линии на отдельные элементы;
- формирование гипотезы относительно работы терминала;
- формализация технологических процессов.

Анализ работы терминала по перевалке угля показал, что УТ является сложной производственной системой, связь в которой осуществляют технические (*Th*), технологические (*Tech*), организационные (*Org*), информационные (*Inf*) и логистические (*Log*) подсистемы, которые, в свою очередь, можно рассматривать как отдельные системы:

$$УТ_{\text{пр}} = \{Th, Tech, Org, Inf, Log\}. \quad (4)$$

Системные элементы (подсистемы) УТ должны обеспечить не только своевременную отгрузку ТС, но также промышленную и экологическую безопасность терминала.

Рассмотрим УТ как функциональную систему, обеспечивающую хранение, перегрузку угля и обработку ТС:

$$УТ_{\text{функ}} = \{УС, Th, ТС\}, \quad (5)$$

где УС — угольный склад, состоящий из отдельных штабелей.

Объединив производственную (4) и функциональную (5) модели систем, получим полную системную модель УТ:

$$УТ = УТ_{\text{пр}} \cup УТ_{\text{функ}} = \{Th, Tech, Org, Inf, Log, УС, ТС\}. \quad (6)$$

Для определения связующих звеньев между элементами системы рассмотрим структуру модели (6).

Из оргграфа (см. рис. 1) видно, что при нарушении физических связей: *перегрузочное оборудование* → *транспортное средство* → *угольный склад*, УТ остановит основной вид деятельности — обработку ТС. На рис. 1 сплошной линией обозначены физические связи между подсистемами УТ, пунктирной линией — управляющие и информационные связи.

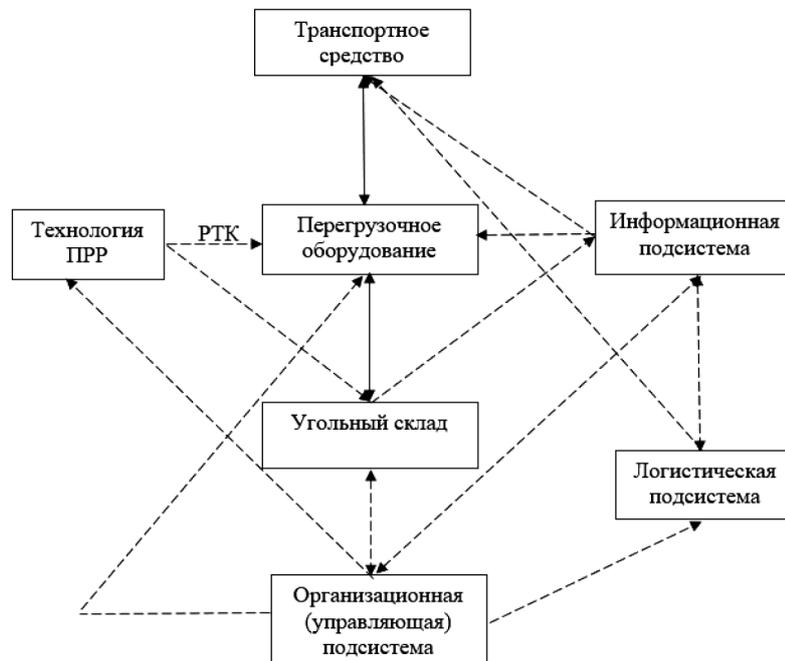


Рис. 1. Оргграф модели угольного терминала

Физические связи подсистем: ПО → ТС → УС (рис. 2) осуществляются посредством ПО, оснащенного грейфером, который является звеном, осуществляющим передачу груза, и конвейером, также передающим обрабатываемый груз в штабель и к ПО. Уголь на склад может подаваться через конвейерную ленту или через бункер, а на транспортное средство – через бункер или грейфером. Функционирование и безопасная эксплуатация УТ зависят от работоспособности парка ПО и его элементов, имеющих непосредственное соприкосновение с обрабатываемым грузом: грейфером и конвейерной лентой.

Решение задачи по обеспечению безопасного производства (БП) погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) базируется на разработке рабочих технологических карт (РТК), методики выявления закономерностей возникновения аварийных ситуаций и оценке их влияния на общий уровень безопасности УТ. Прогнозирование и моделирование вероятных аварийных ситуаций позволяют определить пути их решения. Такие превентивные меры позволят сотруднику при возникновении таких ситуаций действовать уверенно, минимизируя возможные отрицательные последствия. Для моделирования ситуаций введем следующие обозначения:

$S = (S_1, \dots, S_n)$ — банк вероятных ситуаций;
 $f(x/S_i)$ — плотность вероятности описания x ситуации, при условии, что описание принадлежит к ситуации S_i ;
 z_1, z_2, \dots, z_n — вероятность возникновения ситуации, где $\sum z = 1, z > 0$.
 $D_d = (D_1, \dots, D_m)$ — множество решений возникших ситуаций, где пространство решений D состоит из $m + 1$ возможных решений. Для определения предпочтительного решения определяют решающее правило $\lambda(x)$, которое может быть представлено как распределение вероятностей на пространстве решений D [7].

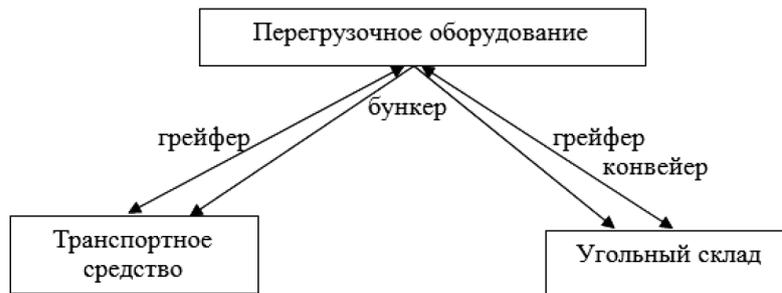


Рис. 2. Связь подсистем: ПО → ТС → УС

Сложность исследования и решения проблем экологической и промышленной безопасности (ПБ) заключается в том, что ее непосредственное измерение невозможно. Безопасная и эффективная работа $УТ$ зависит от применяемого ПО и его технического состояния, технологических процессов, наличия технологической документации (ТехД), своевременного и качественного выполнения ремонтных работ (РР) ПО, проведения организационных мероприятий (ОМ):

$$БП = f(ПО, ТехД, РР, ОМ). \quad (7)$$

С целью формализации технологических процессов введем следующие обозначения:
 t — модельное время для суточного периода моделирования, представленное целочисленной переменной со значениями от 0 до 1080 (поминутная дискретизация);

V — количество угла на терминале (емкость УТ);

G — группа угля: антрациты (А), бурые (Б), каменные (К).

$M = \{m_1, \dots, m_k\}$ — марка угля;

N — количество единиц перегрузочного оборудования;

$B(t) = \{b_1(t), \dots, b_k(t)\}$ — вектор состояний перегрузочного оборудования в момент t .

Состояние b_j описывается переменной со значениями: 0 — ожидание, 1 — занятость, -1 — неисправность. При моделировании и декомпозиции ПО поиск неисправности, а следовательно, и время простоя в ремонте сокращаются [8].

$X\{x_1(t), \dots, x_v(t)\}$ — вектор состояний угольного штабеля в момент t .

Состояние $x_i(t)$ описывается в виде набора переменных:

$$x_i(t) = \{v_i, \zeta_i, \pi_i, j_i, \mu_i, \tau_i(t), \alpha_i, \omega_i, \lambda, h\}. \quad (8)$$

Здесь v_i — объем грейфера;

ζ_i — объем ТС находящегося под обработкой;

j_i — производительность ПО, обслуживающего i -е ТС;

π_i — наличие средств пылеподавления при обработке ТС;

μ_i — физическое состояние угля в штабеле;

$\tau_i(t)$ — длительность обработки ТС;

α_i — высота подъема;

ω_i — нормативная длительность обработки i -го ТС;

λ — высота угольного штабеля;

h — высота подъема грейфера.

Результаты (Results)

При перегрузке угля для уменьшения пыления стремятся к уменьшению высоты сбрасывания и числа перевалок угля. Достичь этого можно используя на терминале современное ПО и технологии формирования штабеля и обработки ТС. Большинство УТ используют грейферные порталные и козловые краны и перегружатели оснащенные грейфером. На специализированных современных терминалах используются судопогрузочные машины, штабель формируется стакером-реклаймером. Не все терминалы могут позволить себе техническое перевооружение, которое требует больших капитальных вложений и занимает длительный период времени. В связи с этим ведутся поиски экологически безопасных технологий обработки угля. На экологическую безопасность УТ оказывают влияние не только используемая технология и ПО, но и техническое состояние ПО.

В работе [9] предлагается использовать грейферы большой вместимости, что влечет за собой замену кранов. Использование грейфера с большим объемом уменьшит количество циклов при погрузке и, следовательно, уменьшится пылеобразование как от грузовых операций, так и от ветрового воздействия на верхний слой штабеля, который будет уменьшаться при загрузке судна. При этом предлагается использовать специальный бункер, а грейфер разгружать внутри бункера. Для предотвращения пыления при загрузке судна предлагается использовать защитный быстросъемный сетчатый экран, которым закрывается пространство от трюма судна до стрелы грейферно-бункерного перегружателя [10]. Однако, если возникнет необходимость проводить грузовые операции без бункера, то грейфер увеличенного объема не сможет разгружать полувагоны, а при их загрузке будет много просыпей. При этом такой вариант требует капитальных вложений на техническое перевооружение. Наиболее экономичным способом борьбы с пылью является орошение [11], однако этот способ применим только при положительных температурах воздуха.

Технология перегрузки угля должна обеспечивать скорость ПРР. Для этого требуется, чтобы ПО было в исправном или работоспособном состоянии. При использовании грейферных кранов определены методы потерь посредством пылеуноса [6], [10], [12], но не рассмотрено влияние на просыпи и пылеунос технического состояния грейфера, от которого зависит пыление груза и скорость обработки ТС, данный вопрос в научной литературе не рассматривался. Для уменьшения пыления на грейфер устанавливали специальные распылители воды или поверхностно-активных веществ, которые образуют микроскопическую жидкую пленку, которая увеличивает адгезионные свойства угольной пыли и кусков угля, однако этот способ эффективен только при положительных температурах. В зимний период используют снежные пушки.

На УТ используют два вида грейферов: устанавливаемые на порталные краны (канатного типа) и устанавливаемые на перегружатели с гидравлическим приводом. Перегружатели получили широкое распространение при обработке вагонов и небольших судов. В работе [13] указывается на необходимость точного взвешивания угля при погрузке вагонов и предлагается специальное взвешивающее устройство, встроенное в бункер, через который осуществляется загрузка вагона. При использовании перегружателя использование бункера не обязательно, так как взвешивающее устройство можно установить между стрелой и грейфером и на специальном устройстве будет отражаться вес каждого подъема. Наличие такого устройства на перегружателе позволит сократить время технологических операций по обработке ТС, так как не нужно будет перемещать бункер с загруженного вагона на пустой.

Техническое состояние грейфера канатного типа зависит от степени износа «челюстей» и их закрытия. В основном при перегрузке угля используются двухчелюстные грейферы, но на перегружателях могут устанавливаться и многолепестковые грейферы. В последнем случае их работоспособность зависит не только от степени износа, но и от работы гидравлической системы, а также настройки синхронизации работы лепестков, которые при закрытии должны сойтись в одной точке.

На УТ используются конвейеры, имеющие большую протяженность. При обрыве конвейерной ленты происходит не только просыпание угля, но и прекращение (остановка) ПРР. Причины отказов контейнеров:

- дисбаланс электродвигателя и барабана;
- расцентровка валопроводов: *электродвигатель – редуктор и редуктор – барабан*;
- дефекты элементов соединительных муфт;
- ослабление посадки подшипников;
- дефекты зубчатых передач в редукторе (перекос осей, питтинг, выкрашивание, трещины и т. д.);
- дефекты подшипников (увеличенные зазоры, дефекты тел качения, дефекты сепаратора и смазки);
- дефекты крепления к фундаменту.

Все указанные дефекты оказывают косвенное влияние на работоспособность конвейерной ленты и ее обрыв из-за возникающей вибрации механического оборудования конвейера. Данные дефекты диагностируются *методами вибродиагностики* [14], что позволяет на ранней стадии возникновения дефекта выполнить ремонтные работы по замене или восстановлению дефектного узла или механизма. С помощью вибродиагностики распознаются и обрывы конвейерной ленты. Считывание частоты собственных колебаний конвейерной ленты позволяет обнаружить возникшие дефекты: продольный и поперечный разрывы, износ [15].

Вибрация конвейерной ленты, возникающая в процессе эксплуатации конвейера, оказывает отрицательное влияние на рабочие процессы конвейера и его элементы, которые возникают по ряду причин технологического и эксплуатационного характера. Кроме вибрации, конвейерная лента подвержена также колебательным движениям [16], которые вызваны различными причинами. Однако при использовании вибрационного устройства при помощи вибрации конвейерную ленту можно очистить от налипшего груза [17], что увеличивает ее срок службы и предохраняет от обрывов. Обрыв конвейерной ленты — один из наиболее часто встречающихся дефектов.

Причинами, вызывающими дефекты конвейерной ленты, могут быть:

- плотность и размер фракции угля;
- качество соединения конвейерной ленты;
- изменение геометрии става (деформация);
- несоответствие характеристик конвейерной ленты условиям эксплуатации (нагрузка, температура, скорость движения и др.);
- ударные нагрузки на перегрузочных пунктах;
- износ или заклинивание подшипников роликов и ведомого барабана.

Такие параметры, как плотность и фракционность угля, подлежат контролю, так как увеличение плотности и фракционности приводит к ударным нагрузкам на перегрузочных пунктах. Указанные дефекты, кроме абразивного износа, устраняются в процессе проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту.

Обсуждение (Discussion)

Работа конвейера может быть полностью автоматизирована и управляться компьютерной системой, что позволяет повысить надежность работы и увеличить пропускную способность [18], [19]. Дефекты механического оборудования диагностируются и прогнозируются, что позволяет применять превентивные меры, а дефекты конвейерной ленты на большинстве УТ могут распознаваться только визуальным методом. Австрийской фирмой Littl Ripper создано сканирующее устройство, которое состоит из трех колес, находящихся в постоянном контакте с нерабочей поверхностью конвейерной ленты, и в непрерывном режиме работы осуществляет контроль за образованием разрывов. Среднее колесо снабжено ультразвуковым датчиком, на двух других установлены приемники ультразвуковых сигналов. Все колеса соединены с узлом контроля. От среднего колеса подается сигнал. При целостности ленты ультразвуковой сигнал передается на движущуюся ленту и считывается приемниками двух других колес. При изменении внутренней структуры ленты прохождение ультразвука через такую ленту затруднено. Если звуковой сигнал снижается в течение короткого промежутка времени, то происходит остановка конвейера и подается звуковой сигнал [20].

Поперечный разрыв ленты возможен при использовании лент специальной конструкции, в которых имеются проводниковые петли, вставленные в ленту при производстве. С данных проводниковых петель информация считывается специальными сканерами [21]. При использовании резинотросовых лент помимо визуального контроля используется метод неразрушающего контроля — применение вихретоковых дефектоскопов позволяет выявить локальные дефекты конвейерной ленты [22], которые можно устранить. От срока службы конвейерной ленты зависят затраты на эксплуатацию конвейерной линии, и как следствие, это обстоятельство оказывает влияние на экономическую составляющую УТ.

Еще одним элементов ПО являются бункеры. Бункеры на УТ устанавливаются на сопряженных участках технологической линии, где машины работают в разных режимах — конвейер как машина, работающая непрерывно, а грейферный перегружатель, работающий как машина циклического действия. Основными дефектами бункерных устройств являются повреждения металлоконструкций и разрыв сварных швов. Причины вызывающий данные дефекты — ударный нагрузки от падения перерабатываемого груза и при ударах грейфером при загрузке бункера. Еще одним дефектом, оказывающим влияние на скорость обработки ТС, является сводообразование «залипание» угля в бункере, в результате чего прекращается подача угля на конвейерную ленту или на ТС. Основными причинами сводообразования являются крупные фракции и повышенная влажность угля.

Заключение (Conclusion)

В статье описана модель УТ и выявлены слабые звенья, от работоспособности которых зависят его функционирование и безопасная эксплуатация. Полученные результаты показывают, что кроме технических средств защиты от пыления на экологию также оказывает влияние и техническое состояние элементов ПО, имеющих непосредственный контакт с углем (грейфер, конвейерная лента, бункер). Дефекты механического оборудования ПО диагностируются различными способами. Современные информационные технологии способны передавать параметры работы механизмов на удаленные серверы. Сложнее обстоит ситуация с диагностированием грейфера, так как дистанционно грузозахватные органы не диагностируются. Выявление дефектов, в основном износ пар трения, выполняется только визуально.

Описанные диагностические методы [14], [15], [20]–[22] конвейерных лент не обладают достаточной точностью, в некоторых случаях необходимо проводить дополнительные расчеты для определения дефекта. Кроме состояния конвейерной ленты необходимо контролировать величину износа обкладок, правильность выбора ее рабочей стороны, состояние стыков, прямолинейность и симметричность расположения ленты на роликах. Для обеспечения непрерывного контроля конвейерных лент необходимо изменять технологию их изготовления — встраивать в них специальные ответные элементы, отражающие сигнал от лазерных или ультразвуковых модулей, посылающих и считывающих ответный сигнал.

Бункерные устройства должны иметь постоянный визуальный контроль, при обработке угля необходимо следить за его фракционным составом и влажностью, что позволит предотвратить сводообразование и снижение пропускной способности.

Осуществление своевременного контроля, а также проведение организационно-технических мероприятий позволят продлить срок эксплуатации элементов перегрузочного оборудования и сохранить показатели пропускной способности терминала на заданном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демченко И. И. Технология погрузки угля в специализированные контейнеры на углепогрузочном комплексе / И. И. Демченко, В. А. Ковалев, А. О. Муленкова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2014. — № 8. — С. 9–13.
2. Гончарук С. М. Проблемы негативного влияния на экологию окружающей среды экспорта угля и пути их ликвидации / С. М. Гончарук, Е. А. Дроздов, В. А. Крапивный // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2017. — № 5. — С. 188–191.

3. *Костюничев Д. Н.* Обоснование параметров портовых открытых складов для сыпучих грузов с учетом их потерь от пылеуноса: дис. ... канд. техн. наук / Д. Н. Костюничев. — Н. Новгород, 2008. — 21 с.
4. *Отделкин Н. С.* Оценка потерь сыпучих грузов при обработке транспортных средств грейферными кранами / Н. С. Отделкин, Е. И. Адамов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 146а–149.
5. *Отделкин Н. С.* Теоретические основы оценки потерь сыпучих грузов и защиты окружающей среды от пылеобразования при перегрузке и хранении в портах: дис. ... д-ра техн. наук / Н. С. Отделкин. — Н. Новгород, 2009. — 40 с.
6. *Степанов А. Л.* Создание технологических транспортных процессов с учетом экологических требований: дис. ... д-ра техн. наук / А. Л. Степанов. — СПб., 1993. — 55 с.
7. *Зуб И. В.* Контейнерный терминал как объект управления охраной труда и промышленной безопасностью / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные исследования, экономика: сб. ст. 13-й Международной науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — Т. 1. — С. 288–292.
8. *Sokolov S.* The Simulation Model as a Tool for Diagnostics of Operation Equipment / S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyil, Y. Ezhov, I. Zub // Journal of Engineering Science & Technology Review. — 2016. — Vol. 9. — Is. 5. — Pp. 176–181.
9. *Адамов Е. И.* Совершенствование методов определения и снижения потерь от пылеобразования при перегрузке сыпучих грузов грейферными кранами и перегружателями: автореф. канд. техн. наук / Е. И. Адамов. — Н. Новгород: ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2010. — 23 с.
10. *Сикарев С. Н.* Повышение сохранности сыпучих грузов путем снижения потерь от пылеуноса при загрузке (разгрузке) судов в портах: дис. ... канд. техн. наук / С. Н. Сикарев. — Н. Новгород, 2008. — 21 с.
11. *Балабас Л. Х.* Оценка системы эффективной борьбы с пылью орошением посредством применения туманообразующих завес / Л. Х. Балабас, Г. К. Сапарова, В. В. Триков // Труды университета. — 2016. — № 2 (63). — С. 55–57.
12. *Адамов Е. И.* Метод оценки потерь сыпучих грузов при грузовой обработке грейферными кранами / Е. И. Адамов, Н. П. Гладков, В. Е. Тяжелов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — № 45. — С. 109–112.
13. *Акашев А.З.* Совершенствование технологической схемы погрузки угля в железнодорожные вагоны / А. З. Акашев [и др.] // Наука и мир. — 2014. — Т. 1. — № 5 (9). — С. 81–83.
14. *Герике Б. Л.* Распознавание эксплуатационных дефектов ленточных конвейеров методами вибродиагностики / Б. Л. Герике, П. Б. Герике // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № S10. — С. 77–83.
15. *Кожушко Г. Г.* Определение характеристик повреждений конвейерной ленты (вторая задача вибродиагностики) / Г. Г. Кожушко, Д. Ю. Семёнов, Д. А. Ямпольский // Известия Уральского государственного горного университета. — 2000. — № 9. — С. 143–150.
16. *Терезюк П. С.* Влияние колебания ленты конвейера на ее техническое состояние / П.С. Терезюк // Universum: Технические науки. — 2014. — № 8 (9). — С. 1.
17. *Захаров А. Ю.* Вибрация ленты и рабочие процессы конвейера / А. Ю. Захаров, Н. В. Ерофеева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2015. — № 6 (112). — С. 78–83.
18. *Каширских В. Г.* Компьютерная система управления конвейерной линией / В.Г. Каширских, А. Е. Медведев // Вестник Кузбасского горного университета. — 2005. — № 6 (51). — С. 51–55.
19. *Зуб И. В.* Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 41–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-41-48/.
20. *Папоян Р. Л.* Технические усовершенствования на конвейерном транспорте / Р. Л. Папоян // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2011. — № 12. — С. 59–66.
21. *Черемушкина М. С.* Построение системы диагностики конвейерного транспорта / М. С. Черемушкина, В. А. Соловьёв // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — № 3-3. — С. 202–207.
22. *Волоховский В. Ю.* Оценка показателей надежности резиновых конвейерных лент по результатам неразрушающего контроля / В. Ю. Волоховский [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № S16. — С. 54–77.

REFERENCES

1. Demchenko, I. I., V. A. Kovalev, and A. O. Mulenkova. "Technology of loading coal in specialized containers on a coal-loading complex." *News of the Higher Institutions. Mining Journal* 8 (2014): 9–13.
2. Goncharuk, S. M., E. A. Drozdov, and V. A. Krapivny. "Problems of the negative impact on the ecology of the environment of exports of coal and ways to eliminate them." *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznikh dorog* 5 (2017): 188–191.
3. Kostyunichev, D. N. Obosnovanie parametrov portovykh otkrytykh skladov dlya sypuchikh gruzov s uchetom ikh poter' ot pyleunosa. Abstract of PhD diss. Nizhnii Novgorod, 2008.
4. Otdelkin, N.S., and E.I. Adamov. "Method to estimate loss of bulk cargoes when handling with grabbing crane." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2011): 146a–149.
5. Otdelkin, N. S. Teoreticheskie osnovy otsenki poter' sypuchikh gruzov i zashchity okruzhayushchei sredy ot pyleobrazovaniya pri peregruzke i khraneni v portakh. Abstract of Dr. diss. Nizhnii Novgorod, 2009.
6. Stepanov, A. L. Sozdanie tekhnologicheskikh transportnykh protsessov s uchetom ekologicheskikh trebovani. Abstract of Dr. diss. SPb., 1993.
7. Zub, I. V. "Konteynernyi terminal kak ob»ekt upravleniya okhranoi truda i promyshlennoi bezopasnost'yu." *Vysokie tekhnologii, fundamental'nye issledovaniya, ekonomika: Sbornik statei 13-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologii v promyshlennosti i ekonomike»*. Vol. 1. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 288–292.
8. Sokolov, S., A. Nyrkov, S. Chernyi, Y. Ezhov, and I. Zub. "The Simulation Model as a Tool for Diagnostics of Operation Equipment." *Journal of Engineering Science & Technology Review* 9.5 (2016): 176–181.
9. Adamov, E. I. Sovershenstvovanie metodov opredeleniya i snizheniya poter' ot pyleobrazovaniya pri peregruzke sypuchikh gruzov greifernymi kranami i peregruzhatel'nyami. Abstract of PhD diss. Nizhnii Novgorod: FGOU VPO VGAVT, 2010.
10. Sikarev, S. N. Povyshenie sokhrannosti sypuchikh gruzov putem snizheniya poter' ot pyleunosa pri zagruzke (razgruzke) sudov v portakh. Abstract of PhD diss. Nizhnii Novgorod, 2008.
11. Balabas, L. Kh., G. K. Saparova, and V. V. Trikov. "Otsenka sistemy effektivnoi bor'by s pyl'yu orosheniem posredstvom primeneniya tumanoobrazuyushchikh zaves." *Trudy universiteta* 2(63) (2016): 55–57.
12. Adamov, E. I., N. P. Gladkov, and V. E. Tyazhelov. "Method of assessment of loss in bulk cargo handling, grapples." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 45 (2015): 109–112.
13. Akashev, A. Z., O. T. Balabayev, T. S. Katiyev, and N. D.-U. Adilova. "Improvement of the technological scheme of the coal filling in railway cars." *Science and world* 1.5(9) (2014): 81–83.
14. Gerike, B. L., and P. B. Gerike. "Raspoznavanie ekspluatatsionnykh defektov lentochnykh konveierov metodami vibrodiagnostiki." *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* S10 (2009): 77–83.
15. Kozhushko, G. G., D. Yu. Semenov, and D. A. Yampol'skii. "Opredelenie kharakteristik povrezhdenii konveiernoi lenty (vtoraya zadacha vibrodiagnostiki)." *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* 9 (2000): 143–150.
16. Terezyuk, Pavel. "Variation effect of a conveyor belt on its technical position." *Universum: Tekhnicheskie nauki* 8(9) (2014): 1.
17. Zaharov, Alexander Yu., and Natalya V. Erofeeva. "Vibration of the belt and workflows of the conveyor." *Vestnik of Kuzbass State Technical University* 6(112) (2015): 78–83.
18. Kashirskikh, V. G., and A. E. Medvedev. "Komp'yuternaya sistema upravleniya konveiernoi liniei." *Vestnik Kuzbasskogo gornogo universiteta* 6(51) (2005): 51–55.
19. Zub, Igor Vasilevich, and Yyri Evgenevich Ezhov. "Modeling of functioning of the transport terminal nested petri nets." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 41–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-41-48.
20. Papoyan, R. L. "Technical improvements on conveyor transport." *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* 12 (2011): 59–66.
21. Cheremushkina, M., and V. Soloviev. "Construction of system of diagnostics of conveyor transport." *Izvestiya Tula State University* 3-3 (2010): 202–207.
22. Volokhovskii, V. Yu., A. N. Vorontsov, V. P. Radin, and M. B. Rudyak. "Otsenka pokazatelei nadezhnosti rezinotrosovykh konveiernykh lent po rezul'tatam nerazrushayushchego kontrolya." *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* S16 (2009): 54–77.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуб Игорь Васильевич —

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

Ежов Юрий Евгеньевич —

кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ezhovye@gumrf.ru

Шульга Ольга Владимировна —

специалист по хранению грузов
ООО «Порт Логистик»
188800, Российская Федерация, Ленинградская
область, г. Выборг, ул. Южный Вал, 1
e-mail: olga-shulga1996@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, Igor V. —

PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zubiv@gumrf.ru

Ezhov, Yurii E. —

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

Shulga, Olga V. —

cargo storage specialist
Port Logistics Ltd.
1 Yuzhny Val Str., Vyborg, Leningrad region, 188800,
Russian Federation
e-mail: olga-shulga1996@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 21 мая 2019 г.
Received: May 21, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498

A METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SEAPORT WAREHOUSES USING THE IMITATION MODELING METHODS

S. S. Valkova, Yu. I. Vasil'ev

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

A method for assessing the technological parameters of a seaport warehouse, which is its main infrastructure facility, is proposed in the paper.

It is noted that a significant increase in the ships size, the expansion of their specialization, the changes in processing technologies and methods of organizing their movement, as well as a change in the seaports role in the global transport and technological network, the high variability of transport flows and the dynamic of the cargo base entail a change in the requirements of port capacities, and the environmental restrictions most often exclude their extensive development. Containerization, packaging, consolidation of cargo units of the freight allows introducing the modern equipment and load handling devices into the transshipment process, which leads to changes in the technology of cargo transshipment, which, in turn, expands the specialization of the port infrastructure elements. Under these conditions, it is necessary to pay attention to changing conditions, standards and quality of technological design of the port complexes, which will improve the efficiency of seaports and cargo terminals, as well as improve the service quality for freight carriers. Losses from insufficiently efficient use of the operating resources of seaports must be balanced with losses from their shortages.

The currently used methods of designing seaports, developed under the command and administrative economic system, become a source of potential danger for the successful operation of the seaport. As a result, the problem of creating new, more adequate and accurate methods for calculating the parameters of the port main structural elements is becoming increasingly important. Since, first of all, such structural elements include warehouses of various functional purposes, the consistent and interrelated method of applying the developed methods and proposed models, which constitutes a new technological design tool for seaports and terminals in terms of their basic infrastructure elements, is substantiated in the paper.

Within this framework, the regulatory calculations are analyzed as a method for assessing the central values of the warehouse technological parameters; a sequence of the developed models is proposed as a mean of establishing their adequacy; a method for using the models sequence as a tool for technological design is formulated; a description of the practical use of the proposed methodology is given.

Keywords: seaports, warehouses, technological design, simulation, storage capacity.

For citation:

Valkova, Svetlana S., and Yurii I. Vasil'ev. "A methodology for assessing the seaport warehouses using the imitation modeling methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498.

УДК 656:6

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СКЛАДА МОРСКОГО ПОРТА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. С. Валькова, Ю. И. Васильев

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

Предлагается методика оценки технологических параметров склада морского порта, являющегося его основным инфраструктурным объектом. Отмечается, что существенный рост размеров судов, расширение их специализации, изменение технологий обработки и способов организации их движения, а также изменение роли морских портов в глобальной транспортно-технологической сети, высокая изменчивость транспортных потоков и динамичность грузовой базы влекут за собой изменение требований к пропускной способности портовых мощностей, а экологические ограничения чаще всего исключают простое экстенсив-

ное их развитие. Контейнеризация, пакетирование, укрупнение грузовых единиц груза позволяют внедрять в перегрузочный процесс современную технику и грузозахватные приспособления, что влечет за собой изменений технологий перегрузки грузов, а последнее, в свою очередь, расширяет специализацию элементов портовой инфраструктуры. В этих условиях необходимо обратить внимание на изменение условий, норм и качества технологического проектирования портовых комплексов, что позволит повысить эффективность работы морских портов и грузовых терминалов, а также улучшить качество обслуживания грузоперевозчиков. Потери от недостаточно эффективного использования операционных ресурсов морских портов должны быть сбалансированы с потерями от их дефицита. Обращается внимание на то, что используемые в настоящее время методы проектирования морских портов, разработанные в условиях командно-административной экономической системы, становятся источником потенциальной опасности для успешной деятельности морского порта и, как следствие, проблема создания новых, более адекватных и точных методов расчета параметров основных структурных элементов порта приобретает особую актуальность. Поскольку, в первую очередь, к таким структурным элементам относятся склады различного функционального назначения, в статье обосновывается последовательная и взаимосвязанная методика применения разработанных методов и предложенных моделей, которая составляет новый инструментарий технологического проектирования морских портов и терминалов в части их основных инфраструктурных элементов. В рамках этого проанализированы нормативные расчеты как метод получения начальных оценок технологических параметров склада, предложена последовательность разработанных моделей в качестве средства установления их адекватности, сформулирована методика использования последовательности моделей как инструмента технологического проектирования, дано описание практического использования предлагаемой методики.

Ключевые слова: морские порты, склады, технологическое проектирование, имитационное моделирование, вместимость склада.

Для цитирования:

Валькова С. С. Методика оценки склада морского порта методами имитационного моделирования / С. С. Валькова, Ю. И. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498.

Введение (Introduction)

Принципы, методы и технологии расчета параметров элементов портовой инфраструктуры регламентируются нормативным документом¹, методический инструментарий которого в настоящее время подвергается все более интенсивной критике, причиной которой служит давний срок подготовки материалов, в основе которых находятся исследования, проведенные в середине XX в. Методологической основой всего инструментария, предусмотренного нормами технологического проектирования морских портов (НТПМП), является расчетно-аналитический подход в виде формульных потоковых вычислений. Имеющиеся в неявном виде компоненты вероятностно-статистических моделей включены в методику расчетов без учета множества факторов, влияющих на их применимость, адекватность и точность. Следовательно, проблема создания новых, более адекватных и точных методов расчета параметров основных структурных элементов порта становится все более актуальной. К одному из основных структурных элементов морского порта относятся складские мощности. Задача качественного повышения эффективности их использования является наиболее важной при технологическом проектировании морских портов [1], [2].

Вопросами изучения морских портов и грузовых терминалов в современных условиях, эффективного использования их инфраструктурных объектов, проблем технологического проектирования занимались многие зарубежные и отечественные ученые [3]–[9]. Так, в работе [8], например, определена роль морского порта в современных условиях и рассмотрены основные показатели их работы, в работе [3] сформулированы основные функции современного морского порта. В работе [10] авторы приводят основные недостатки существующей нормативной базы по технологическому проектированию морских портов. Справочные материалы и различные практические рекомендации периодически публикуются такими изданиями, как World Bank, UNCTAD, НРС и др. [8], [11]–[12]. Однако, несмотря на достаточную изученность многих научных вопросов,

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов (введ. в действие 01.09.2018).

некоторые задачи, касающиеся, например, совершенствования проектирования складских мощностей морских портов и грузовых терминалов, так и остаются нерешенными.

Цель предлагаемого исследования заключается в повышении эффективности использования складов, являющихся основным инфраструктурным элементом морского порта, путем определения баланса между рисками, их нехватки и недоиспользования. Для достижения поставленной цели предлагается использование теоретически обоснованного метода многокритериальной оптимизации размеров склада, а также оценка влияния различных стохастических факторов на работу склада и порта и в целом. Для решения этой задачи необходимо проанализировать существующие методы технологического проектирования морских портов, сформулировать основные требования и характеристики новых инструментов проектирования для определения вместимости склада, что позволит разработать последовательность имитационных моделей обобщенного склада морского порта в качестве центрального элемента исследований, фокусирующихся на динамике поведения объема хранения. Кроме того, необходимо разработать методику доказательства адекватности разработанных моделей и выполнить экспериментальную оценку эффективности созданного инструментария, на основании чего предложить методику его использования в качестве способа технологического проектирования и управления работой морского порта.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Все морские порты и терминалы для тех грузов, которые определяют профиль их специализации, выполняют если не идентичные, то близкие по составу функции. Основные функции склада морского порта подробно рассмотрены в работе [13]. Для эффективного использования этих функций в морских портах и терминалах предусматриваются различные функциональные элементы, которые связаны между собой и образуют внутреннюю транспортно-технологическую систему соответствующего инфраструктурного объекта. В этой же работе автором была представлена универсальная функциональная структура транспортно-технологической системы порта или терминала общего вида, отражающая специфику выполнения указанных функций. Детализация основных элементов функциональной структуры транспортно-технологической системы морского порта, анализ выполняемых ими операций и определение связей между ними позволяют сделать вывод о том, что ключевая роль в обеспечении функциональной деятельности морского порта и терминала, в значительной степени определяющая уровень качества оказываемых им услуг и уровень их эффективности, принадлежит грузовому складу.

В работе [14] отмечается, что объем находящегося груза на складе в каждый момент времени является единым интегральным параметром, характеризующим работу склада. Совокупный результат действия всех факторов, относящихся к функциям склада, зависит от изменений указанного параметра во времени. Интенсивность поступления груза на склад и его убытие оказывают влияние на динамику изменений объемов хранения на складах морских портов, что описывается дифференциальными или конечно-разностными уравнениями.

Фактическое изменение количества груза, находящегося на складе (в большую или меньшую сторону), определяется как разность прибывшего и убывшего на терминал груза за произвольный период: год, месяц, смена, час. Различные склады, описываемые уравнением (1), покажут одинаковую динамику изменений: скорость изменения объема складирования есть разница между скоростью поступления груза на склад $i(t)$ и скоростью вывоза груза со склада $o(t)$. При этом абсолютные значения объема хранения у этих складов будет отличаться на величину C :

$$E(t) = \int_0^t e(t) = \int_0^t i(t) dt - \int_0^t o(t) dt = I(t) - O(t) + C, \quad (1)$$

где C — произвольная константа.

Получение соответствующей зависимости производится с точностью до произвольной постоянной величины, которая определяется начальными условиями, а по факту характеризует компоненту складирования, отвечающую за коммерческой хранение.

Колебания объемов находящегося на складе груза определяются пространственными и временными различиями скоростью поступления груза на склад и скоростью вывоза груза со склада. Пространственные различия определяются разбросом физического количества прибывающего и убывающего груза в рассматриваемый период, а временные — распределением объемов по отдельным дискретам этого периода.

Среднее значение объема хранения определяется соотношением:

$$E = \frac{N \cdot V_n \cdot T_{\text{xp}}}{365} = \frac{Q_{\text{год}} \cdot T_{\text{xp}}}{365}, \quad (2)$$

где N — общее количество партий груза хранящихся на складе; V_n — объем n -й партии груза; T_{xp} — средний срок хранения партий; $Q_{\text{год}}$ — объем груза, проходящий через склад за год.

Величина $NV = Q_{\text{год}}$ — объем груза, проходящего через склад за год.

С другой стороны, средний интервал между поступлениями грузовых партий на склад, составляет $T_{\text{инт}} = \frac{T}{N} = \frac{365}{N}$, откуда получим

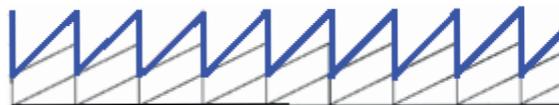
$$E = \frac{N \cdot V \cdot T_{\text{xp}}}{365} = \frac{V \cdot T_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}}. \quad (3)$$

Целью оценки требований к объему единовременного хранения является стремительное развитие складских мощностей. При этом возникает потребность в получении оценки возможных максимальных значений и распределение частот их наблюдения. Для простейшего треугольного закона формирования грузовых партий, при котором время хранения составляет половину времени формирования партии $T_{\text{форм}} = 2T_{\text{xp}}$, формула (4) дает возможность оценки не только среднего, но и максимального объема хранения груза, т. е. размера склада:

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{VT_{\text{форм}}}{2T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{T_{\text{форм}}}{T_{\text{инт}}} + 1 \right). \quad (4)$$

Нормы технологического проектирования морских портов, которые в настоящее время строго регламентируют применяемые методы и используемые процедуры в технологическом проектировании, предлагают именно такой вид формулы для определения максимального объема хранения груза на складе порта. Однако на динамику изменения объема хранения более существенное влияние оказывает флуктуации размеров партий груза и интервалов их поступления на склад (рис. 1).

а)



б)



Рис. 1. Суммарный объем хранения: а — при регулярном поступлении партий на склад; б — при иррегулярном поступлении партий на склад

Аналогичные изменения будут наблюдаться и при колебаниях размера партий вокруг среднего значения. Результирующие графики в этом случае покажут гораздо более высокую динамику. Расчет максимального размера склада добавлением половины объема партий по формуле (4) не учитывает влияния действия указанных факторов, которое может быть весьма существенным

во много раз превышая предлагаемую поправку. Неравномерные, но регулярные флуктуации значений приводят к появлению регулярных «биений» в графиках изменения результирующих функций. Если отдельные значения подвержены произвольным колебаниям, то это будет приводить к иному характеру поведения результирующих функций.

Для планирования физических размеров склада требуется выполнить оценку максимальных значений его размера. Возможным решением является использование метода статистических испытаний (Монте-Карло), который позволяет получать не только более точные средние значения, но и оценивать разброс вокруг них. Исполнительным механизмом указанного метода является последовательная генерация значений случайных величин, входящих в исследуемую зависимость и дальнейшее использование сгенерированных значений для вычисления значения функции по одной из формул: (2) или (3). Полученный статистический массив значений случайной величины подвергается обработке, в результате которой формируется приближение интегральной функции распределения.

Пример использования указанного метода для определения интегральной функции распределения случайных величин (объема партии груза, срока хранения партии и интервала поступления партий) подробно изложен автором в работе [14]. Там же рассмотрен пример статистического массива значений случайных величин и выполнена его обработка, по результатам которой получена гистограмма распределения вероятности значений объема хранения груза на складе. В работе [15] отмечается, что в реальных условиях характер поступления партий на склад является смешанным: одна часть грузопотока обслуживается судами, работающими по линейному расписанию, слабо определенному или точному (магистральные специализированные контейнеровозы, работающие на фиксированных стрингах между портами типа «hub» или «gateway»), а также варианты прибытия в выделенные временные окна.

Другую категорию режима поступления партий образуют суда, интервал судозаходов которых является случайной величиной (большинство фидерных контейнеровозов, балкеры, танкеры, конвенциональные суда). Для оценки параметров склада, связанного с обработкой судов, движущихся по расписанию, наиболее подходят аналитические алгебраические методы. Для подобной оценки при случайном характере судозаходов адекватным становится метод статистических испытаний (Монте-Карло). В соответствии с теорией массового обслуживания (ТМО) формирование потоков событий из нескольких компонент разной статистической природы, адекватность утрачивают и аналитические, и вероятностно-статистические методы.

Если в качестве примера предположить, что порт обрабатывает несколько групп судов (линий) с разными, но равномерными интервалами между судозаходами и идентичными судовыми партиями, то в результате моделирования соответствующих процессов будет получен результирующий график (рис. 2), из которого видно, что формирование грузовых партий на складах порта для данного примера характеризуется значительной неравномерностью.

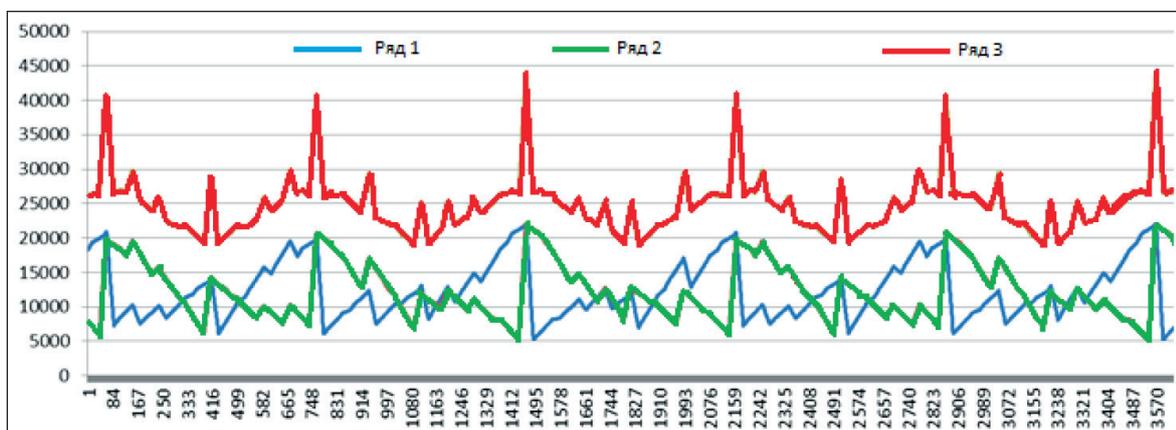


Рис. 2. Результирующий график формирования грузовых партий с учетом экспортной и импортной составляющих

Как видно на рис. 2, отклонения от средних значений существенно (в разы) превышают размеры отдельных судовых партий. При сочетании картины регулярных судозаходов с потоком случайных характер возникающих флуктуаций предсказать невозможно. В данном исследовании решение этой проблемы предлагается в форме построения имитационной модели поступления в порт судов, разделенных на произвольное число компонент с разными стохастическими характеристиками.

Начальный этап моделирования предполагает активацию процесса генерации случайных величин — судозаходов различных типов судов, подчиняющихся различным законам распределения интервалов, имеющих разбросы объемов судовых партий и времени обслуживания, отличающихся различными законами распределения срока хранения относительно средних величин. На этом этапе предполагается активация процесса генерации случайных величин, т. е. судозаходов разных типов судов, которые подчиняются разным законам распределения интервалов, имеющих разбросы объемов судовых партий и времени обслуживания, отличающихся различными законами распределения срока хранения относительно средних величин.

Многовариантный анализ моделирования в этом случае предполагает получение случайных величин двух видов:

- генерации случайной выборки событий (прибытие судов в порт);
- генерации индивидуальной партии для каждого судозахода.

Прибытие судов в порт является в данном случае реализацией совокупности случайных и детерминированных величин (интервалов судозахода). Генерация случайных судозаходов осуществляется по законам, задаваемым порядком распределения Эрланга. С ростом порядка указанного закона судозаходы асимптотически приближаются к равномерным интервалам, малые значения порядка Эрланга делают распределения, близкими к Пуассоновскому. Такой широкий спектр, управляемый выбором единственного параметра в одном и том же законе распределения, позволяет использовать эти формулы в качестве инструмента статистического анализа. Регулярные судозаходы, осуществляемые в соответствии с точным расписанием, задаются в виде аналитических формул. Судозаходы, определяемые временными окнами, генерируются по нормальному распределению с математическим ожиданием на середине окна и среднеквадратичным отклонением, определяемым как шестая часть размера окна. Пример подобного моделирования рассмотрен в работе [15], а результирующий график приведен на рис. 3.

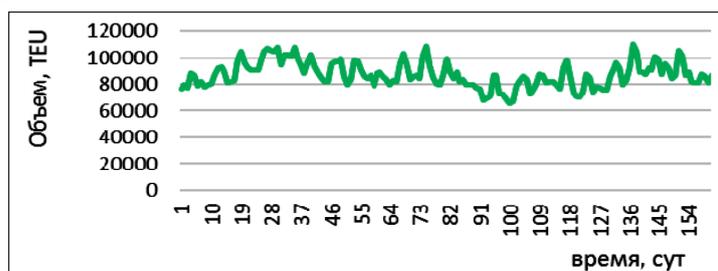


Рис. 3. Динамика изменения суммарного объема хранения

Каждый из потоков судов, участвующий в генерации судозаходов, связан с определенным размером импортной и экспортной партии. Среднее значение объема партии в каждом потоке и разброс значений вокруг него также задаются при описании модели. Указанные параметры позволяют генерировать соответствующую партию со случайным объемом, способом расформирования и средним сроком хранения. Генерация индивидуальной партии производится для каждого события — судозахода.

Результат моделирования, пример которого приведен на рис. 3, по своей природе аналогичен статистическому ряду, получаемому в результате использования традиционных методов статистических испытаний: он показывает, какие значения и с какой частотой наблюдались в ходе выполняемого эксперимента. Обработка полученного статистического ряда такими же стандартными методами математической статистики позволяет получить плотность распределения искомой случайной величины — объема хранения груза на складе морского порта. Предлагаемая имита-

ционная вероятностно-статистическая модель динамики склада предназначена в большей степени для уточнения представлений о границах его изменчивости. Модель не учитывает ограничения, вносимые нехваткой ресурсов грузовых фронтов, что может привести к появлению очереди судов в ожидании обслуживания в условиях переполнения склада.

Особенностью склада морского порта является необходимость оценки не просто требований к объему хранимого груза или его поведения в случае неограниченных размеров ресурсов, связанных с организацией этого хранения, но и влияния этих ограничений на изучаемые качественные и количественные характеристики системы складирования. Данная особенность не позволяет ограничиться только расчетно-аналитическими и вероятностно-статистическими методами, поступающие на склад партии груза могут получить отказ в обслуживании или встретить необходимость ожидания в очереди на обслуживание.

Как отмечалось ранее, изменение требований к пропускной способности портовых мощностей в современных условиях вызывает необходимость ее тщательного анализа и диагностики. Пропускная способность порта определяется производительностью самого слабого звена технологической цепи грузообработки, что заставляет заниматься детальным изучением как технических характеристик отдельных элементов морского порта, так и их совместного влияния. Несответствие отдельных характеристик элементов порта существующему спросу приведет к росту очереди транспортных средств на подходах к порту и, как следствие, к уходу грузопотока на конкурирующие терминалы.

Развитие порта, как правило, влечет за собой увеличение грузопотока, вследствие чего возникает необходимость более точной оценки существующих производственных мощностей и пропускной способности. При планировании портом увеличения грузопотока возникает необходимость оценки соответствия производительности обработки железнодорожных составов, вместимости склада и соответствующего роста грузопотока через морской грузовой фронт (МГФ) [16], [17]. Взаимодействие технологических звеньев морского порта с внешним железнодорожным транспортом является ключевым фактором его операционной работы [18], [19]. Для решения подобной задачи может служить имитационное моделирование рассматриваемого процесса, что позволит произвести оценку существующей ситуации и спрогнозировать показатели эффективности при изменении входных данных (объема, структуры, неравномерности грузопотока и т. д.), а также определить ключевые параметры, изменение которых приведет к достижению желаемого результата [20].

Моделирование процесса грузообработки на терминале с учетом случайного характера прибытия судов позволяет получить представление о возникновении и динамике очереди железнодорожных составов, а также оценить загруженность судов. В качестве примера подобного рода моделирования на рис. 4 представлены графики изменения очереди поездов у железнодорожного грузового фронта (ЖГФ) и загрузки первых десяти судов (вместимостью 5000 TEU) в одном эксперименте.

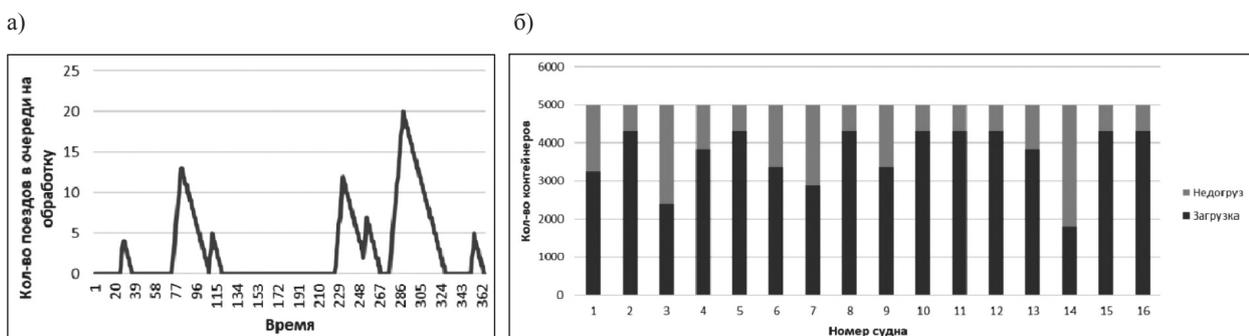


Рис. 4. Наблюдаемые изменения в одном эксперименте:
 а — изменение очереди поездов у железнодорожного грузового фронта;
 б — изменение загрузки судов

В дискретную модель также внесены разбросы загрузки поездов и колебания производительности их обработки. Выходными оцениваемыми параметрами данной модели служат средние значения длины очереди и средняя загрузка судна. Основным изменяемым параметром в данном исследовании выбран максимальный размер склада.

На рис. 5 представлены гистограммы распределения вероятностей появления очередей различной длины и загруженности судов, полученные в результате моделирования работы терминала в течение года.

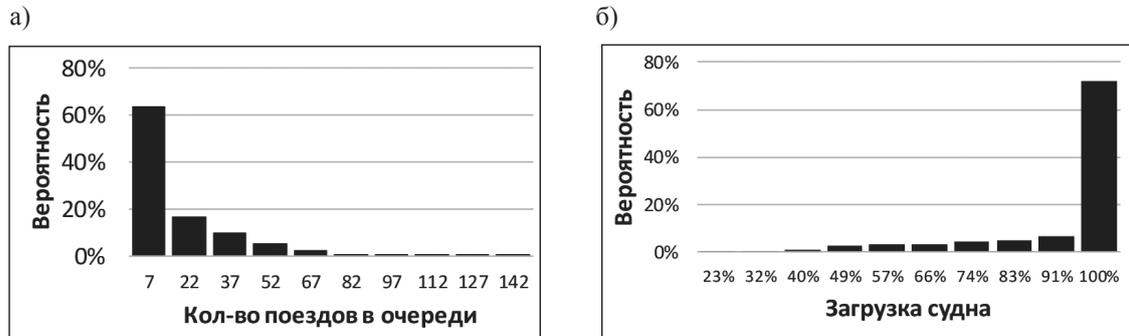


Рис. 5. Гистограммы распределения вероятностей:
а — количества поездов в очереди; б — загрузки судов

На рис. 6 приведена зависимость средней очереди поездов и загрузки судна от вместимости склада.

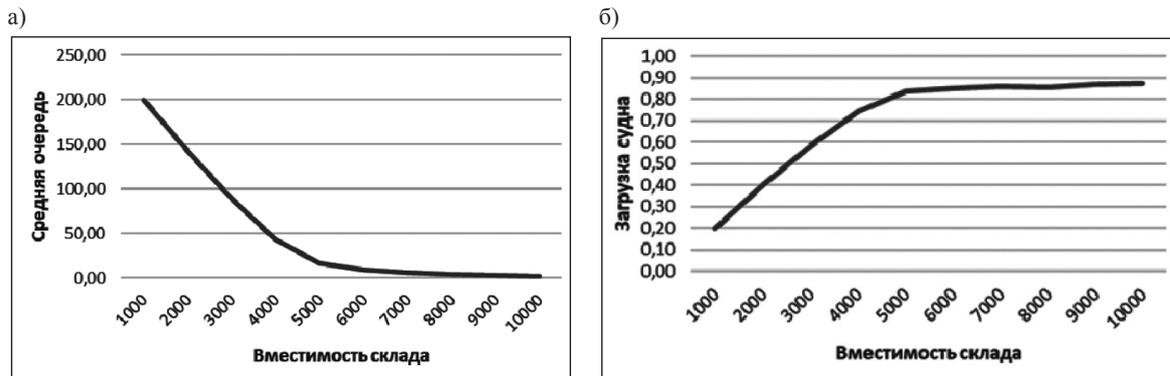


Рис. 6. Зависимость очереди поездов у железнодорожного грузового фронта (а) и загрузки судна (б) от вместимости склада

Кроме того, еще одним управляемым параметром может служить производительность обработки поезда. На рис. 7 показаны зависимости средней длины очереди и загрузки судна от данного параметра.

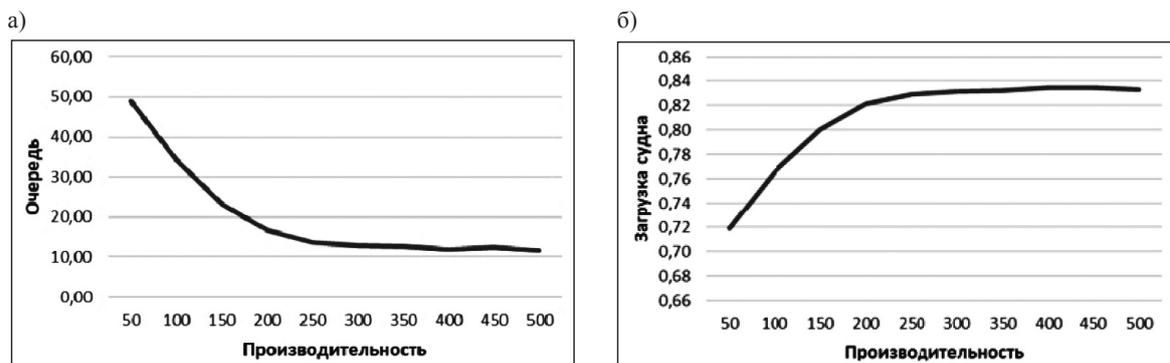


Рис. 7. Зависимость очереди поездов у железнодорожного грузового фронта (а) и загрузки судна (б) от производительности обработки поезда

Таким образом, использование предложенной модели позволяет оценить привлекательность существующего или проектируемого терминала и на основании этой оценки принять решение о необходимости увеличения производительности обработки поездов или об увеличении вместимости склада.

Различные нормативные методики пытаются учитывать вероятностные факторы, приводящие к случайным колебаниям параметров вокруг вычисленного среднего значения за счет введения коэффициента неравномерности $k_{\text{нер}} > 1$, определяемого как отношение максимального значения в один из анализируемых интервалов времени к среднему значению, рассчитанному на всей совокупности интервалов времени. Подобный подход связан с возникновением погрешностей и потерь, которые нельзя предсказать, так как указанный коэффициент есть не исходная, а, скорее, расчетная величина, значение которой должен определить процесс технологического проектирования. Суть технологического проектирования заключается в преобразовании определенного объема исходных данных и представлений в законченный проект, который характеризуется заданной степенью подробности и, соответственно, имеющий несоизмеримо большую размерность данных. Следовательно, на разных стадиях разработки возникают различные требования к содержанию и степени подробности, что объясняет необходимость использования в каждом из них определенных методов анализа вместо попыток разработки единой для всех этапов проектирования универсальной модели.

Методы оценки параметров грузового склада, описываемые в предлагаемом исследовании, формируют последовательность инструментов технологического проектирования, уточняющих и дополняющих друг друга, а также создают возможность применения каждого из них за счет использования предыдущих в этой последовательности. Ни один из рассмотренных методов не является лучшим по отношению к другим или исключающим их результаты. Все вносимые уточнения каждым из предлагаемых инструментов приводят не к сдвигу значений основных параметров, а к более достоверной оценке распределений случайных значений вокруг относительно неизменных центральных значений. Оценка вероятности потерь от создания избытка технологических мощностей, а также от их дефицита позволяет выполнять корректировку проектных решений в зависимости от общих характеристик проекта как объекта предпринимательской деятельности. Именно в этом и заключается новизна и ценность предлагаемого метода.

Одной из значимых проблем применения любых моделей и в особенности имитационно-симуляционных является необходимость объективного доказательства их адекватности исходному моделируемому объекту, без которого гносеологическая ценность любой сколь угодно сложной модели ничтожна, ввиду того, что впечатляющие и подробным образом представленные результаты моделирования могут не отражать реальность и быть качественно хуже самых примитивных, но валидных аналитических оценок. Практическая и теоретическая ценность предложенного в данном исследовании инструментария средств моделирования также требует подобного доказательства.

В проведенном исследовании показано, что предлагаемая последовательность построения имитационных моделей на каждом этапе технологического проектирования использует в качестве исходных данных результаты, полученные начальными расчетно-аналитическими методами или их уточнением последующими расчетными модулями. Такая методология построения моделей и выбор последовательности их использования позволяют получить достаточное доказательство валидности и адекватности созданного средства, что решает одну из главных задач практической применимости моделирования как метода технологического проектирования.

Обсуждение (Discussion)

На основании построенных в предлагаемом исследовании моделей различной точности и различного уровня оказывается возможным предложить методику расчета параметров склада

морского порта, заключающуюся в последовательном развитии представлений и уточнении данных о проектируемом технологическом элементе — грузовом складе морского порта или терминала — в ходе всего процесса его проектирования, строительства и эксплуатации. Общий состав процедуры технологического проектирования как последовательности взаимосвязанных этапов, объединяемых единым процессом передачи и преобразования проектных данных и сопутствующей информации из работы, приведен на рис. 8.

На разных этапах этого процесса требуются данные о его характеристиках в различных форматах, с различной точностью и характеристиками вероятностных разбросов. Склад морского порта является центральным элементом проектируемого объекта как производственной системы, поэтому данные о нем в том или ином виде присутствуют на всех этапах процесса, показанного на этом рисунке.

В соответствии с ранее изложенным, предлагаемая методика включает несколько взаимосвязанных этапов, от уточненных традиционных аналитических оценок до вероятностно-статистических экспериментов. Эти этапы и лежащие в их основе модели обеспечивают непрерывную инструментальную методическую поддержку всего хода процесса проектирования на каждом его этапе, предоставляя возможность возврата и многократного итерационного перепроектирования предшествующих этапов.

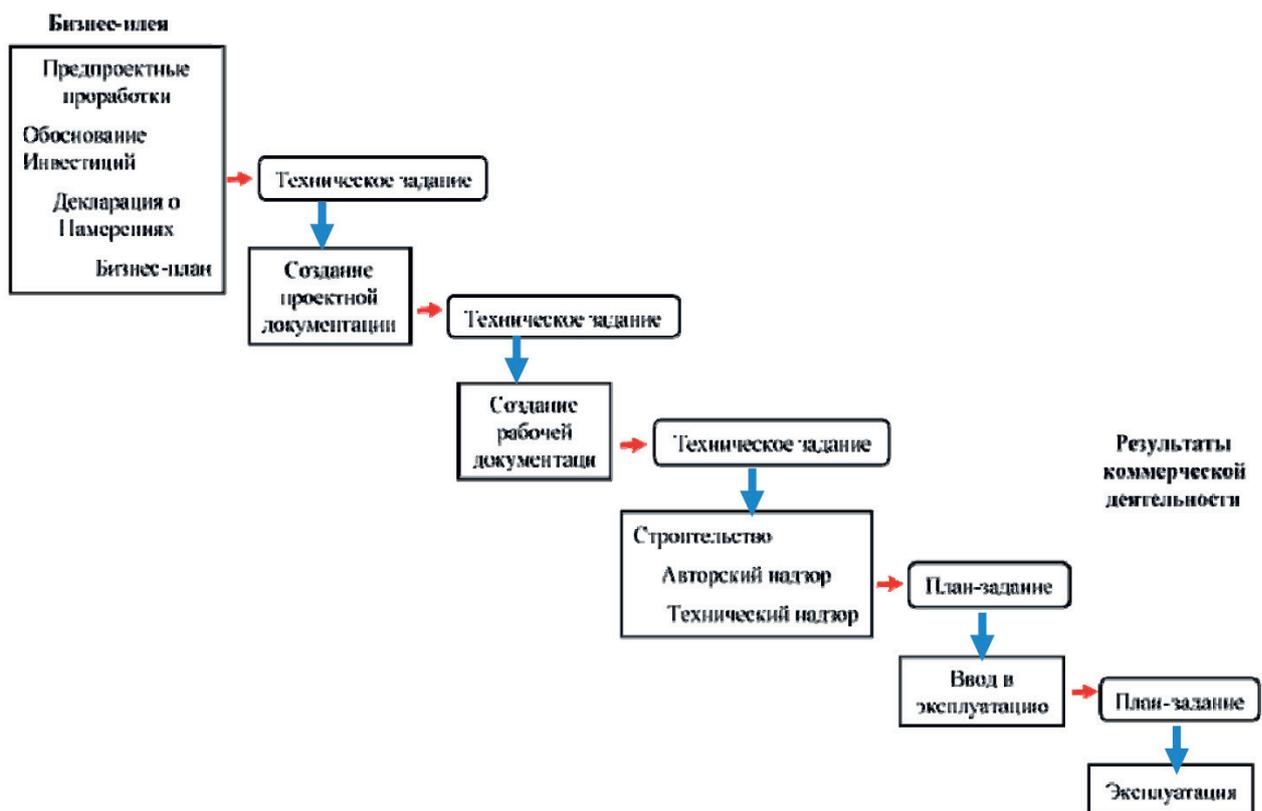


Рис. 8. Стадии технологического проектирования

На завершающих стадиях проектирования после получения всех требуемых значений технологических параметров объекта в качестве окончательного средства верификации полученных значений данное исследование предлагает использовать имитационно-симуляционный метод расчета грузового склада терминала, позволяющий получить наиболее полное и достоверное представление о случайных величинах, которыми являются технологические параметры этого объекта. В общем виде методика показана на рис. 9.

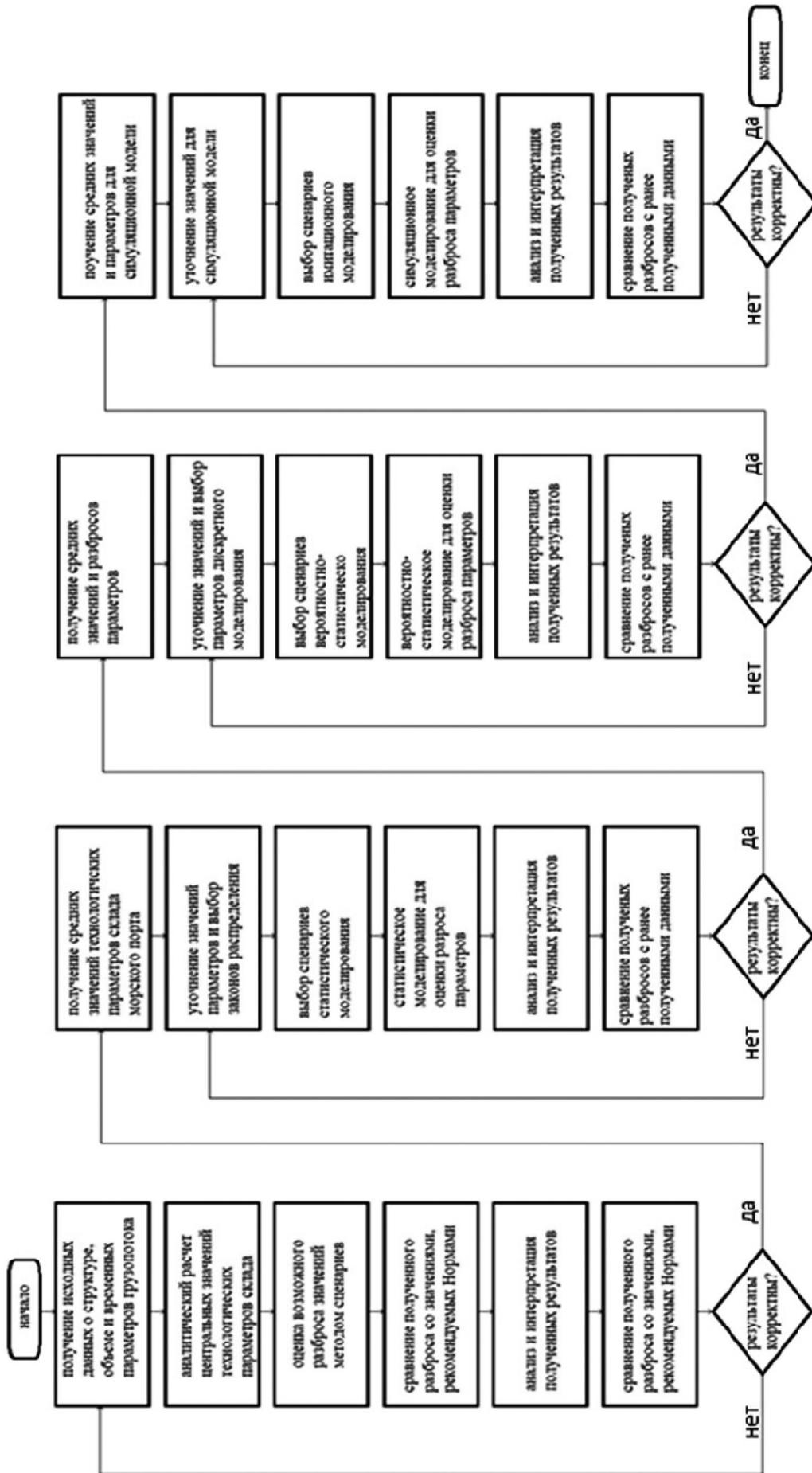


Рис. 9. Блок-схема методики моделирования как инструмента технологического проектирования

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Изменение требований к технологическим характеристикам инфраструктурных элементов портов и грузовых терминалов заставляет пересматривать методический инструментарий их проектирования.

2. Привлекательность проекта порта или терминала сегодня в значительной мере определяется ориентацией на самые передовые технологии транспортировки грузов, на обработку еще не введенного в эксплуатацию тоннажа нового типа, обеспечение более эффективного, по сравнению с конкурентами, использования производственных ресурсов сегодня и в ближайшем будущем, опорой на возможно уникальные технологические инновации, позволяющие порту не только выходить на лидирующие позиции, но и гибко подстраиваться к неизбежным изменениям требований.

3. Сложность и капиталоемкость морского порта, его роль как объекта повышенной опасности, значение для экономики страны — все это, безусловно, требует от проектировщика соблюдения всех соответствующих требований и стандартов, а от государственных органов — тщательного контроля их исполнения. В то же время, любая проектная деятельность по своей природе должна быть ориентирована вперед, в будущее, она должна принимать во внимание не только существующее положение, но и учитывать возможные сценарии развития портовой деятельности.

4. Проектирование морских портов до сих пор регламентируется нормами, созданными в середине XX в., что является объективной предпосылкой для создания новых методов, дополняющих и развивающих традиционно используемый инструментарий технологического проектирования.

5. Полученные на основе результатов проведенного исследования вероятностно-статистический и имитационно-симуляционный методы расчета склада морского порта могут в полной мере быть использованы в технологическом проектировании капиталоемких структурных элементов любых морских портов и терминалов, осуществляющих перевалку различных грузов: навалочных, генеральных, контейнеров.

6. Предложенная по результатам описываемого исследования последовательность моделей и, соответственно, методов их использования, позволяет получать все более точные представления и оценки параметров склада морского порта, что дает возможность предложить законченную и непротиворечивую методику оценки этих параметров на всех этапах технологического проектирования и позднее — управления развитием морских портов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
2. Current issues in shipping, ports and logistics / Т. Notteboom (ed.). — Asp/Vubpress/Upa, 2011. — 608 p.
3. Thorensen C. A. Port designer's handbook / С. А. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
4. Елисеева А. С. Принципы организации грузового терминала / А. С. Елисеева. — Ростов н/Д: Феникс, 2003. — 329 с.
5. Kuznetsov A. L. Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, J.J. Eglit // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
6. Кузнецов А. Л. О несовершенстве нормативной базы технологического проектирования морских портов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // Морские порты. — 2017. — № 6. — С. 18–22.
7. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

8. UNCTAD Monographs on Port Management. Monograph №9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management. — March 1991.
9. *Михаэль Д.* Складская логистика. Новые пути системного планирования / Д. Михаэль; Пер. с нем.; Под ред. Г.П. Манжосова. — М: КИА центр, 2004. — 136 с.
10. International Handbook of Maritime Economics / K. Cullinane (ed.). — London: Edward Elgar Publishing, 2011. — 520 p.
11. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport. White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System. — Publications Office of the European Union, 2011.
12. *Валькова С. С.* Изменение роли грузового склада морского порта в современных транспортно-логистических сетях товаропродвижения / С. С. Валькова // Транспортное дело России. — 2018. — № 3. — С. 110–113.
13. *Валькова С. С.* Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
14. *Валькова С.С.* Оценка параметров склада морского порта методами имитационного моделирования / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 713–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-713-723.
15. *Король Р. Г.* Имитационное моделирование системы «Железнодорожная станция морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216
16. *Ханова А. А.* Имитационная модель грузового порта. Использование технологии имитационного моделирования для оценки качества логистического обслуживания грузового порта / А. А. Ханова, И. О. Григорьева // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2008. — № 1 (42). — С. 97–102.
17. *Соколов А. А.* Основы взаимодействия железнодорожного и водного (морского) транспорта (на примере Мурманского транспортного узла) / А. А. Соколов, А. А. Соловьев // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 48–52.
18. *Heilig L.* Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda / L. Heilig, S. Voß // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Is. 1. — Pp. 35–63. DOI: 10.1007/s10696-016-9237-7.
19. *Кузнецов А. Л.* Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

REFERENCES

1. 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): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
2. Notteboom, Theo, ed. *Current issues in shipping, ports and logistics*. Asp/Vubpress/Upa, 2011.
3. Thorensen, C. A. *Port designer's handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
4. Eliseeva, A. S. *Printsipy organizatsii gruzovogo terminala*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2003.
5. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and J.J. Eglit. “Simulation Model of Container Land Terminals.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13
6. Kuznetsov, A. L., and V. A. Pogodin. “O nesovershenstve normativnoi bazy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov.” *Morskie porty* 6 (2017): 18–22.
7. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. “The development of the functional model for the “dry port” type container terminal and principles of its use in the technologic design.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

8. UNCTAD *Monographs on Port Management. Monograph №9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management.* March 1991.
9. Mikhael', D. *Skladskaya logistika. Novye puti sistemnogo planirovaniya.* Edited by G.P. Manzhosov. M: KIA tsentr, 2004.
10. Cullinane, Kevin, ed. *International handbook of maritime economics.* Edward Elgar Publishing, 2011.
11. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport. *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System.* Publications Office of the European Union, 2011.
12. Valkova, S. "Change of the sea port storage's role in modern logistic supply chain environment." *Transport business of Russia* 3 (2018): 110–113.
13. Valkova, Svetlana S. "Stochastic method for sea port storage capacity calculation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
14. Valkova, Svetlana S. "Simulation for the evaluation of the sea port storage's parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.4 (2018): 713–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-713-723.
15. Korol, R.G., and A.S. Balalaev. "The simulation modeling system «Railway station – seaport» Vladivostok transport hub." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216.
16. Khanova, Anna Alekseevna, and Irina Olegovna Grigorieva. "An imitation model of a cargo port. The use of the technology of imitation modelling for estimation of cargo port logistic service quality." *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1(42) (2008): 97–102.
17. Sokolov, A.A., and A.A. Solovyov. "Interaction of railway and marine transport (Murmansk Transport Hub)." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 48–52.
18. Heilig, Leonard, and Stefan Voß. "Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29.1 (2017): 35–63. DOI: 10.1007/s10696-016-9237-7
19. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, V. A. Pogodin, and V. N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валькова Светлана Сергеевна — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Васильев Юрий Иванович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valkova, Svetlana S. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Vasil'ev, Yurii I. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2019 г.

Received: May 13, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-499-508

METHODS OF THE NAVIGATOR'S COMPETENCE LEVEL IMPROVEMENT ON THE DIFFERENT STAGES OF HIS PROFESSIONAL DEVELOPMENT

D. B. Sigaev, A. P. Shatylo

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

The purpose of this article is to find the methods improving the navigator's competence level during the education process in the maritime educational institutions and extension courses. The research results are displayed in the paper. The research tasks are determination of navigator's subjective perception of own training level in educational institutions, which they have been graduated from; identifying dependencies and patterns of the obtained results from such personal data as the form and level of education, age, position and work experience. As a result, it is determined that 66 % of the respondents believe that the obtained knowledge is sufficient for work. Thus there is a shortage of skilled specialists among navigators – 34 % of navigators, graduated from the maritime educational institution, even on their own opinion, do not have enough knowledge and competence to perform their own duties after graduation. Data concerning the navigator's subjective perception of the education quality in educational institutions, which they have been graduated from, its dependencies from the personal data are the important step on the way of creating the navigator's profессиogram. Actuality of profессиogram use as a part of psychophysiological selection when entering the maritime educational institutions to the Navigation Department are emphasized by the navigators working nowadays: 78 % of the respondents expressed an opinion that psychophysiological selection is necessary. The derived results have a subjective nature and very important, but not decisive. A deeper objective study based on the entering and graduating testing on the extension courses to clarify the obtained results is planning. It is suggested to revise the extension courses organization and introduce the differentiated approach based on the entering testing results. The proper use of profессиogram with well-considered criteria when entering the Navigation Department of the maritime educational institutions, as well as differentiated approach to the navigators in the extension courses are able to become the one of key decisions for the qualitative step towards improvement of the navigator's competence level. This step will lead to the positive trends in risk mitigation, increasing safety of navigation and shipboard operations.

Keywords: navigator, subjective perception, competence, merchant navy, navigation safety, risk mitigation, personnel training, profессиogram.

For citation:

Sigaev, Dmitrii B., and Aleksandr P. Shatylo. "Methods of the navigator's competence level improvement on the different stages of his professional development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 499–508. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-499-508.

УДК 551.577.53:574.23:347.796

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ СУДОВОДИТЕЛЕЙ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИХ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло

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

Рассмотрен актуальный в настоящее время вопрос повышения уровня подготовки судоводителей. В связи со значительным влиянием человеческого фактора на аварийность морских судов поставлена цель нахождения способов повышения качества подготовки судоводителей при обучении в морских учебных заведениях и на курсах повышения квалификации. Представлены результаты исследования, задачами которых являлись: определение субъективного восприятия судоводителями собственного уровня знаний, полученных в оконченных ими морских учебных заведениях; выявление зависимостей и закономерностей полученных результатов от таких персональных данных, как форма и уровень образования, возраст,

должность и опыт работы. Определено, что 66 % опрошенных в ходе исследования судоводителей считают, что полученных знаний достаточно для работы на судах морского флота в занимаемой ими должности. Отмечается, что морская отрасль испытывает дефицит квалифицированных судоводителей — 34 % судоводителей, окончивших морские учебные заведения, по их собственному признанию, не обладают достаточным уровнем подготовки после выпуска. Субъективное восприятие судоводителями уровня подготовки, полученной в оконченных ими учебных заведениях, его зависимости от персональных факторов, которые были определены в ходе исследования, являются важным шагом для работы по созданию профессиограммы судоводителя. Исследован вопрос актуальности использования профессиограммы как части психофизиологического отбора при поступлении для обучения по специальности «Судовождение» в морских учебных заведениях, на основе опроса действующих судоводителей (78 % опрошенных судоводителей сошлись во мнении, что отбор необходим). Выявлено, что субъективный характер полученных результатов имеет важное, но не определяющее значение. Планируется проведение более глубокого объективного исследования на основе входного и выходного тестирования на курсах повышения квалификации с целью уточнения полученных результатов. Предложено пересмотреть организацию работы курсов повышения квалификации и внедрить дифференцированный подход с учетом результатов входного тестирования. Обращается внимание на то, что использование профессиограммы со взвешенными критериями при поступлении для обучения по специальности «Судовождение», а также дифференцированного подхода к специалистам на курсах повышения квалификации способно стать одним из ключевых решений для роста уровня подготовки судоводителей, что, в свою очередь, повлечет за собой положительные тенденции в снижении уровня рисков, повышении безопасности мореплавания и судовых операций.

Ключевые слова: судоводитель, субъективное восприятие, торговый флот, безопасность мореплавания, снижение рисков, подготовка кадров, профессиограмма.

Для цитирования:

Сигаев Д. Б. Способы повышения уровня подготовки судоводителей на разных этапах их профессионального развития / Д. Б. Сигаев, А. П. Шатыло // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 499–508. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-499-508.

Введение (Introduction)

В условиях глобализации кадрового рынка и с переходом на высокотехнологичные приемы труда, привязанность к конкретным видам труда перестала являться сдерживающим фактором для работников многих отраслей: по статистике до 70 % дипломированных специалистов работают не по избранной специальности [1]. Особенно это заметно на морском флоте, так как глобализация труда ярко выражена в последнее время.

В 1996 г. Генеральный секретарь Международной морской организации Уильям О' Нил отметил особую важность хорошего морского опыта и традиций, утрата которых чревата ростом субстандартного судоходства. Если ранее субстандартное судоходство предполагало главным образом техническое состояние судна, то в настоящее время проблема касается также качества профессиональной подготовки кадров [2]. Сейчас для повышения безопасности мореплавания предпринимаются определенные шаги, связанные главным образом с повышением контроля морских судов и экипажей. При этом следует отметить, что только лишь усиление контроля — это неэффективный путь [3].

Снижение уровня морского образования является мировой тенденцией и ведет к дефициту квалифицированных кадров на судах морского флота во всем мире. Опрос моряков в Германии, проведенный газетой Lloyd List, показал, что на вопрос: «Готовы ли Вы рекомендовать выбранную вами профессию своим детям и родственникам?» — 83 % респондентов ответили отрицательно. На этот же самый вопрос отрицательный ответ дали 84 % российских моряков, обучавшихся на курсах повышения квалификации в Институте дополнительного профессионального образования Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. В то же время на вопрос: «Правильную ли Вы выбрали профессию?» — 80 % респондентов дали положительный ответ. На вопрос: «Как объяснить столь противоречивые ответы?» — чаще других был дан ответ: «Мы учились в другое время и заканчивали другие учебные заведения». Действительно, времена были другие и учебные заведения выделялись качеством подготовки. Кроме того, курсанты были обеспечены полноценной учебной плавательной практикой.

Популярность морских профессий невысока [4]. Но если в странах Европы снижение популярности профессии моряка имело протяженный по времени характер и было связано с ростом зарплат и престижности других профессий, то в России этот процесс носил более резкий характер. Согласно данным ИМО, к основным причинам, снижающим популярность морской профессии, относятся: продолжительность контрактов — 67,6 % опрошенных моряков; большой объем бумажной работы — 34,1 % опрошенных моряков; усталость — 22,3 % опрошенных моряков.

Состояние современного кадрового рынка свидетельствует о необходимости более квалифицированного подбора и расстановки кадров [5], [6]. При этом судоводитель должен обладать такими качествами, как стрессоустойчивость, психическая устойчивость, способность к сохранению концентрации для принятия правильных управленческих решений в условиях неблагоприятных погодных условий, накапливающейся в течение рейса усталости и неопределенности при принятии решений [7], [8], требующей переключения внимания, что является неотъемлемым аспектом работы [9]. По мнению исследователей, вероятность проблем со здоровьем нарастает нелинейно [10], [11], один-два фактора усталости увеличивают риски вдвое, семь-восемь факторов повышают риск в 30 раз.

В определенной степени, повышению безопасности мореплавания может способствовать отбор при приеме в морские учебные заведения [12] и дальнейшее психофизиологическое сопровождение [13], [14]. Согласно имеющимся данным [15], многолетний опыт профессионального отбора в промышленности и армии США показал, что его использование оказывает положительное влияние на следующие аспекты:

- снижение аварийности по вине персонала на 40–70 %;
- снижение количества отчислений в учебных заведениях с 30–40 % до 5–8 %;
- повышение надежности систем управления на 10–25 %;
- снижение затрат на подготовку специалистов на 30–40 %.

В связи с ранее изложенным была поставлена цель — найти способы повышения качества подготовки судоводителей как при обучении в морских учебных заведениях, так и при обучении на курсах повышения квалификации. Было решено выполнить оценку уровня подготовки судоводителя на основе анализа субъективного восприятия самих судоводителей собственного уровня знаний. Данные о субъективном восприятии качества образования судоводителей в рамках мирового судоходства отсутствуют. С учетом того, что российские моряки работают во многих иностранных судоходных компаниях, было проведено исследование среди слушателей курсов повышения квалификации в Институте дополнительного профессионального образования Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, задачами которого являлись: определение субъективного восприятия судоводителей собственного уровня знаний, полученных в оконченных ими морских учебных заведениях; выявление зависимостей и закономерностей полученных результатов от таких персональных данных, как форма и уровень образования, возраст, должность и опыт работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ходе исследования использовались данные анонимных опросных листов, которые предлагались для ответа слушателям курсов повышения квалификации, а также продления дипломов капитана, старшего и вахтенного помощников капитана.

Опросный лист включал данные о слушателе, а также 40–60 вопросов (количество вопросов изменялось со временем) о различных профессиональных аспектах работы судоводителя на судах морского флота. В течение многих лет проведения курсов в архиве накопилось большое количество уникальных данных, ранее не публиковавшихся. Авторами были отобраны и обработаны анкеты с целью проведения анализ субъективной оценки знаний судоводителей, исходя из ответа на вопрос: «Достаточно ли Вам знаний, полученных в учебном заведении для работы на судне?».

Данные были категорированы, структурированы по четырем следующим критериям: уровень и форма образования, возраст, должность, опыт работы и представлены в виде графиков. Кроме того, с использованием того же набора анкет был выполнен подсчет утвердительных ответов на вопрос: «Необходим ли, по Вашему мнению, психофизиологический отбор при приеме абитуриентов в морские учебные заведения?» и получены следующие результаты:

1-я категория — по критерию «возраст» было выполнено исследование в соответствии с теорией этапов и кризисов профессионального становления, описанной в книге Г. Шихи «Возрастные кризисы», наиболее близкой к этапам профессионального роста судоводителя:

- 18–22 года — кризис «вырывания корней»;
- 23–29 лет — кризис «искания в двадцать лет»;
- 30–35 лет — кризис «осознания себя в тридцать лет»;
- 36–45 лет — кризис «середины жизни»;
- 45–50 лет — кризис «обновления или покорности».

2-я категория — по критерию «форма и уровень образования» выполнено исследование в соответствии с вариациями форм и уровней, имеющих в образовательной системе, а также их применимости к опрашиваемым специалистам:

- очная и заочная формы;
- высший, высший после среднего и средний уровни образования.

3-я категория — по критерию «должности» выполнено исследование исходя из вариантов, представленных в опросных листах:

- капитан морской (КМ);
- старший помощник капитана (СПКМ);
- второй помощник капитана (2-й ПМК);
- третий помощник капитана (3-й ПМК).

Анализ был выполнен по двум группам: СПКМ и 2-й ПМК в связи с недостаточным количеством данных по оставшимся группам.

4-я категория — по критерию «опыт работы» было выполнено исследование методом деления диапазона возраста опрошенных судоводителей на категории, когда опыт работы оказывает различное влияние на формирование профессионального взгляда судоводителя.

Результаты (Results)

На рис. 1 показаны графики, демонстрирующие результаты опроса по критериям «уровень образования» (см. рис. 1, *а*) и «форма и уровень образования» (см. рис. 1, *б*). По данному критерию построены две диаграммы с целью показать результаты опроса в зависимости от уровня образования, а также в совокупности от формы и уровня образования.

Из представленной информации выделены следующие закономерности:

68 % судоводителей, окончивших высшие учебные заведения (далее — вуз), ответили, что им хватает знаний, полученных при обучении, для выполнения своих должностных обязанностей.

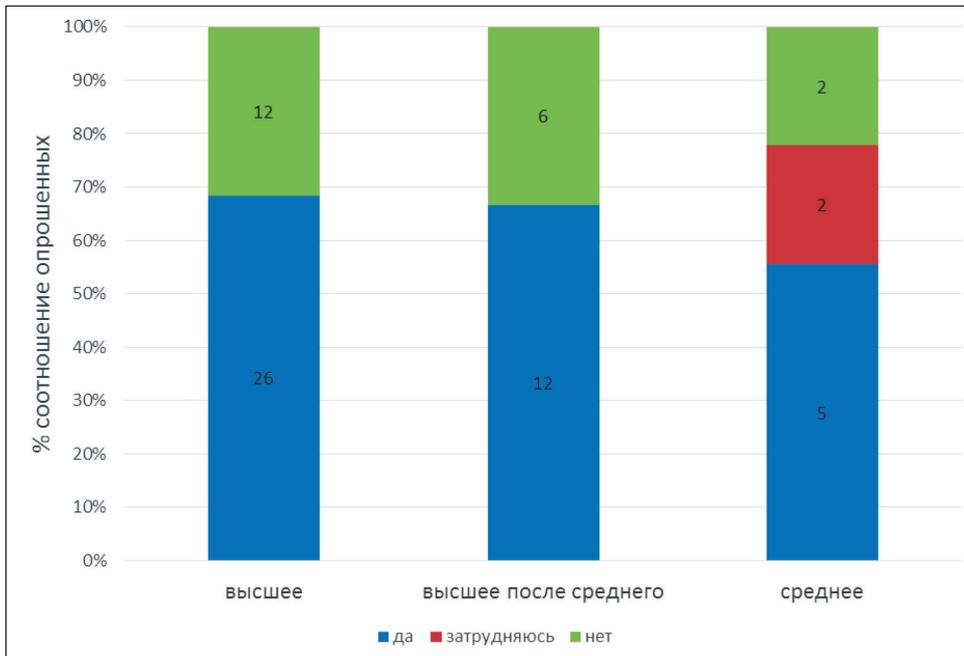
67 % опрошенных, окончивших вуз после среднего специального учебного заведения (далее — ссуз), дали утвердительный ответ относительно достаточности знаний.

55 % выпускников морских ссузов ответили, что полученных знаний хватает для работы на судне.

Опрос, результаты которого показаны на рис. 1, доказал, что выпускники вузов, не имеющие среднего специального образования и окончившие заочное отделение вуза, имеют более низкий уровень подготовки, чем все остальные обладатели дипломов о высшем образовании. Этот факт можно объяснить недостатком базовой подготовки в совокупности с необходимостью освоения большого количества материала в самостоятельной форме при заочном обучении — 50 % опрошенных дали положительный ответ на заданный вопрос. Таким образом, уровень образования и подготовки выпускников морских вузов превосходит ссузы, что, в конечном счете, выражается в более высокой компетенции выпускников вузов, позволяя более полно и качественно выполнять

свои профессиональные задачи. Процентное соотношение утвердительно ответивших выпускников вузов очного и заочного отделения, имеющих среднее профессиональное образование, практически равны, что может свидетельствовать об осознанности выбора профессии данной категорией выпускников и их нацеленности на результат.

а)



б)

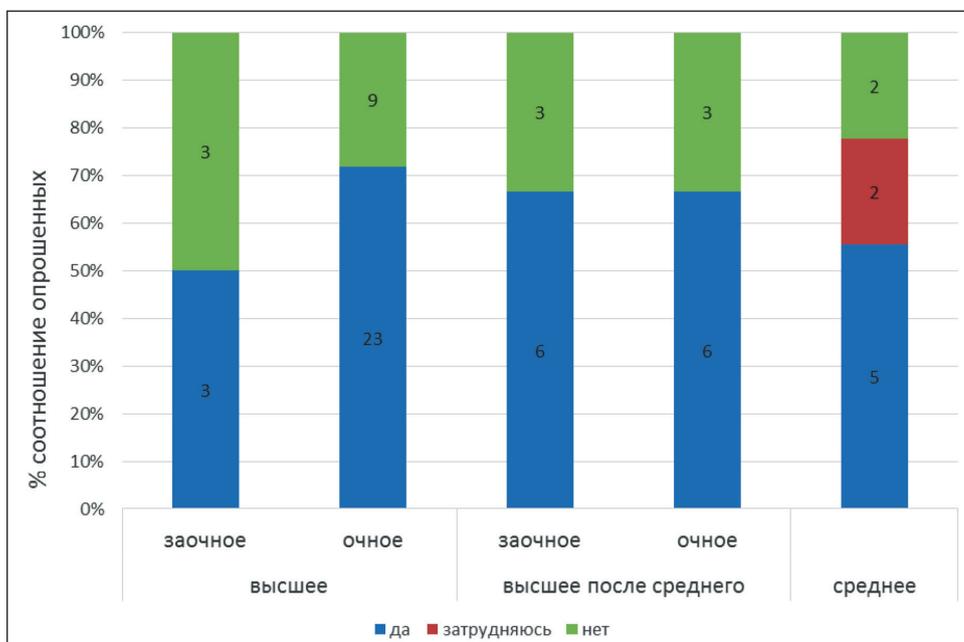
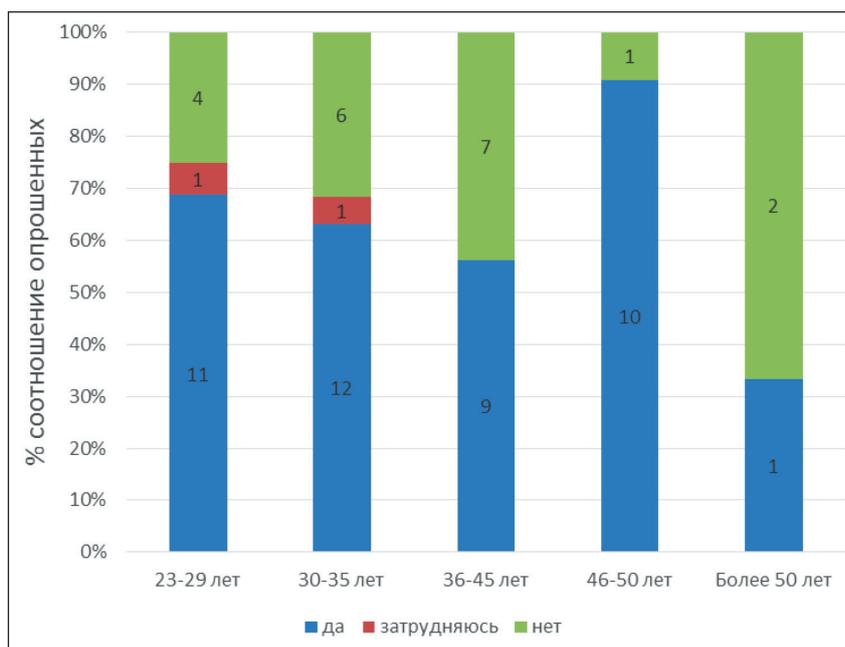


Рис. 1. Результаты опроса: а — по критерию «уровень образования»; б — по критерию форма и уровень образования

Примечание. Цифры в столбцах графика соответствуют количеству опрошенных слушателей

На рис. 2, а показан график результатов опроса по критерию «возраст», на 2, б — график результатов опроса по критерию «должность».

а)



б)

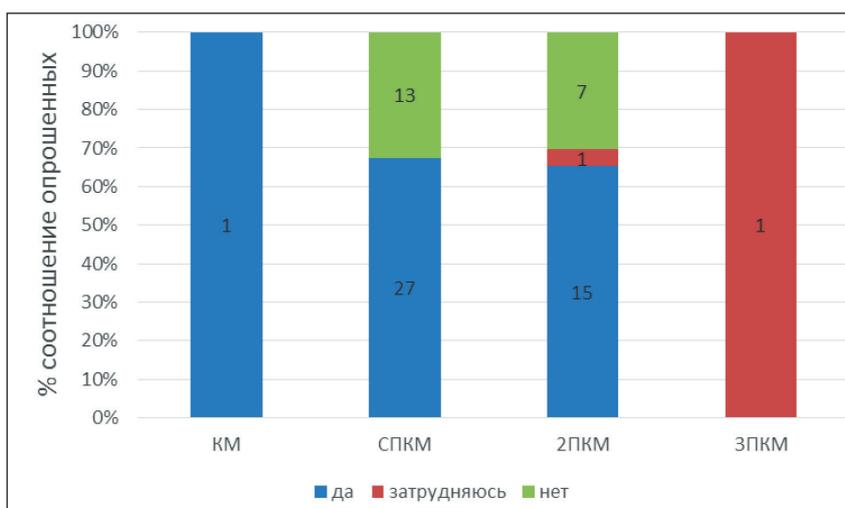


Рис. 2. Результаты опроса: а — по критерию «возраст»; б — по критерию «должность»

Примечание. Цифры в столбцах графика соответствуют количеству опрошенных слушателей

По результатам анализа данных на вопрос: «Достаточно ли Вам знаний, полученных в учебном заведении для работы на судне?» — ответили утвердительно:

- 69 % судоводителей возрастной категории 23–29 лет;
- 63 % судоводителей возрастной категории 30–35 лет;
- 56 % судоводителей возрастной категории 36–45 лет;
- 91 % судоводителей возрастной категории 46–50 лет.

Несмотря на объективно снизившийся уровень образования, молодые специалисты все же уверены в достаточном уровне подготовки, что, скорее всего, свидетельствует о повышенном уровне самоуверенности. Далее наблюдается тенденция к снижению с увеличением возрастной категории: с увеличением возраста повышается как личностная, так и реактивная тревожность, которая заставляет усомниться в достаточности полученной подготовки. Столь низкий процент

утвердительных ответов категории 36–45 лет может свидетельствовать о наступлении «кризиса середины жизни», что сопровождается, согласно теории Г. Шихи, угасанием карьерных устремлений и желанием начать все «с нуля».

Опрос, результаты которого показаны на рис. 2, б, продемонстрировал следующие закономерности:

1. 68 % опрошенных СПКМ считают, что знаний, полученных в учебном заведении, достаточно для работы в этой должности.

2. 65 % опрошенных 2ПКМ считают, что знаний, полученных в учебном заведении, достаточно для работы в этой должности.

На рис. 3 показан график результатов опроса по критерию «опыт работы» (цифры в столбцах графика соответствуют количеству опрошенных слушателей).

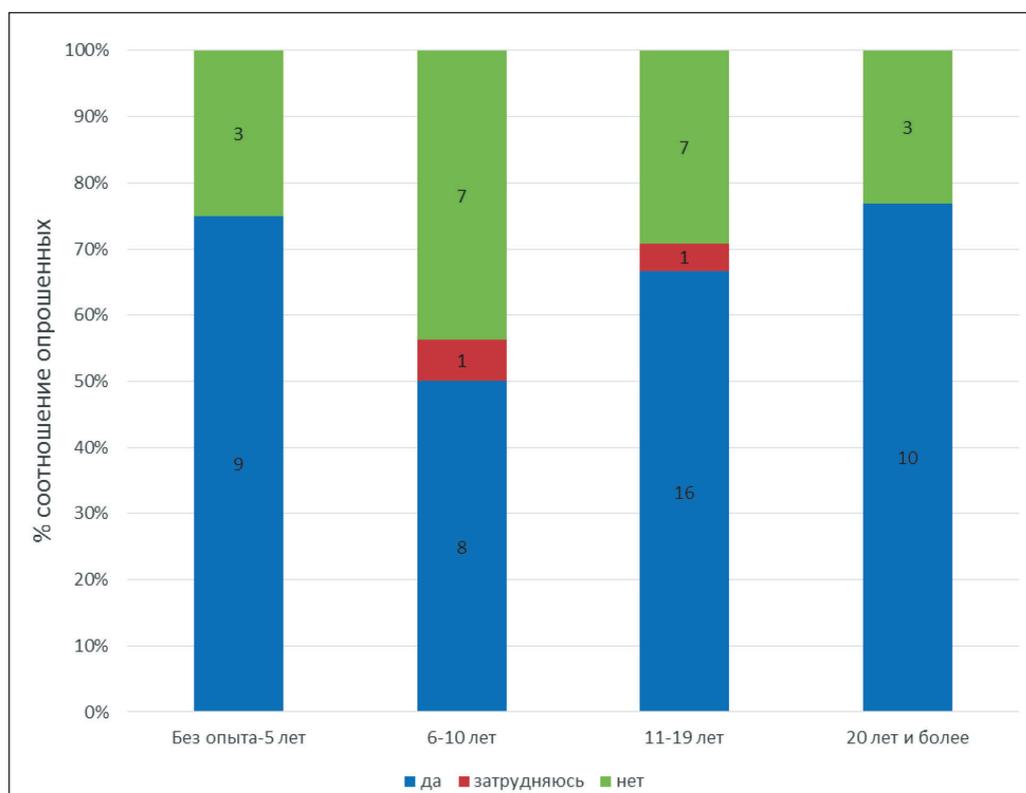


Рис. 3. Результаты опроса по критерию «опыт работы»

Примечание. Цифры в столбцах графика соответствуют количеству опрошенных слушателей

По результатам анализа данных на вопрос: «Достаточно ли Вам знаний, полученных в учебном заведении для работы на судне?» утвердительно ответили:

- 75 % опрошенных с опытом работы от 0 до 5 лет;
- только 50 % опрошенных с опытом работы от 6 до 10 лет;
- 67 % опрошенных с опытом работы от 11 до 19 лет;
- 77 % опрошенных с опытом работы более 20 лет.

Примечание. Проценты указаны отдельно для каждой категории.

Завышенный уровень самоуверенности опрошенных с опытом работы от 0 до 5 лет можно объяснить юношеским максимализмом. Сомнения в уровне полученных знаний опрошенных категории с опытом работы от 6 до 10 лет связаны с приобретенным опытом, который необходим для адекватной оценки ситуации. Более высокая степень уверенности категории опрошенных с опытом работы от 11 до 19 лет свидетельствует о более высоком уровне образования по окончании вуза по сравнению с предыдущими категориями опрошенных. Наиболее высокие показатели

у опрошенных с опытом работы более 20 лет свидетельствуют о высоком уровне знаний, полученных во время обучения и большом профессиональном опыте.

Обсуждение (Discussion)

В результате исследования определено восприятие судоводителями собственного уровня знаний, полученных в оконченных ими морских учебных заведениях: 66 % (согласно подсчету утвердительных ответов в анкетах, использованных в исследовании) опрошенных судоводителей считают, что полученных знаний достаточно им для работы. Выявлено, что уровень подготовки судоводителей зависит от ряда персональных факторов, таких как форма и уровень образования, возраст, должность и опыт работы, установлены зависимости между полученными параметрами. Цифры, полученные в результате исследования, убедительно доказывают, что морская отрасль испытывает дефицит квалифицированных судоводителей — 34 % штурманов, по их собственному признанию, не получили достаточного уровня подготовки после окончания учебного заведения. Факт этого признания должен вызвать обеспокоенность судоводительского сообщества.

Кроме того, в ходе проведенного авторами работы исследования среди слушателей курсов повышения квалификации была собрана информация относительно мнения судоводителей о необходимости проведения психофизиологического отбора при поступлении в морские учебные заведения. По результатам подсчета утвердительных ответов 78 % опрошенных судоводителей сошлись во мнении, что такой отбор необходим.

Заключение (Conclusion)

Уровень субъективного восприятия судоводителями уровня подготовки, полученной в оконченных ими учебных заведениях, а также его зависимость от персональных факторов (форма и уровень образования, возраст, должность и опыт работы), которые были определены в ходе исследования, являются важным шагом для работы по созданию профессиограммы судоводителя. Применение профессиограммы на других видах транспорта приводит к положительным тенденциям в повышении безопасности транспортных процессов. Актуальность использования профессиограммы как части психофизиологического отбора при поступлении на специальность «Судовождение» в морских учебных заведениях отмечена действующими судоводителями.

Субъективный характер полученных результатов имеет важное, но не определяющее значение. Существует необходимость более глубокого объективного исследования на основе проведения входного и выходного тестирования на курсах повышения квалификации с целью уточнения полученных результатов, что позволит продолжить работу в направлении совершенствования уровня подготовки судоводителей. Исходя из ранее изложенного, представляется также целесообразным выполнить подбор критериев при разработке профессиограммы, определяющей качественный потенциал профессии судоводителя. Реализация этого потенциала важна в настоящее время в связи с необходимостью укомплектования судов, работающих тяжелых условиях Арктики, специалистами высокого уровня.

В связи с этим предлагается пересмотреть организацию работы курсов повышения квалификации. К вопросам повышения квалификации необходимо подходить дифференцированно, с учетом результатов входного тестирования, что сделает обучение более динамичным и результативным в зависимости от исходного уровня подготовки специалиста.

Использование профессиограммы со взвешенными критериями, а также дифференцированного подхода к специалистам на курсах повышения квалификации способно стать одним из ключевых решений для роста уровня подготовки судоводителей [16], [17], что, в свою очередь, повлечет за собой положительные тенденции в снижении уровня рисков [18], а также повышении безопасности мореплавания и судовых операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сеннет Р. Коррозия характера / Р. Сеннет, В. Супрун. — Фонд «Тренды», 2014. — 296 с.
2. Григорьев Н. От культуры безопасности мореплавания к культуре уступчивости / Н. Григорьев, М. Наконечный // Морской флот. — 2017. — № 03 (1530). — С. 24–27.
3. Григорьев Н. Контроль безопасности. В поисках панацеи / Н. Григорьев, М. Наконечный // Морской флот. — 2018. — № 05 (1539). — С. 20–24.
4. Sargent C. A review of the physiological and psychological health and wellbeing of naval service personnel and the modalities used for monitoring / C. Sargent, C. Gebruers, J. O'Mahony // Military Medical Research. — 2017. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 1. DOI: 10.1186/s40779-016-0112-3.
5. Marine Navigation: Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017), June 21–23, 2017, Gdynia, Poland / edited by A. Weintrit. — CRC Press, 2017. — 56 p.
6. Contemporary Ergonomics and Human Factors 2015: Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015, Daventry, Northamptonshire, UK, 13-16 April 2015 / edited by S. Sharples, S. Shorrocks, P. Waterson. — CRC Press, 2015.
7. Hareide O.S. Understanding the Eye of the Navigator / O. S. Hareide, R. Ostnes, F. V. Mjelde. — IEEE Aerospace & Electronic Systems Society, 2016.
8. Fan J. The impact of workload and fatigue on performance / J. Fan, A.P. Smith // International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 90–105. DOI: 10.1007/978-3-319-61061-0_6.
9. Weintrit A. Human resources and crew resource management: marine navigation and safety of sea transportation / A. Weintrit, T. Neumann. — 1st Edition. — London: CRC Press, 2011. — 582 p.
10. Smith A.P. Seafarer Fatigue: The Cardiff research programme / A.P. Smith, P.H. Allen, E.J.K. Wadsworth. — Cardiff University, 2006. — 87 p.
11. Шафран Л. М. Физиологогигиенические особенности профессиональной деятельности моряков специализированного флота / Л. М. Шафран, В. В. Голикова // Український журнал з проблем медицини праці. — 2014. — № 3. — С. 29–39.
12. Afanasiev V. Directions of Increasing the Effectiveness of Career Guidance System for Students in Russia / V. Afanasiev, M. Nechaev, S. Frolova, L. Shypovskaia // Astra Salvensis. — 2018. — № 12. — Pp. 193–210.
13. Allen P. Communication on the bridge of a ship / P. Allen, A.P. Smith // Contemporary Ergonomics and Human Factors 2015: Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015, Daventry, Northamptonshire, UK, 13-16 April 2015. — CRC Press, 2015. — P. 433–440.
14. Weintrit A. Safety of Marine Transport: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation / A. Weintrit, T. Neumann. — London: CRC Press, 2015. — 306 p.
15. ЗАО «НЕЙРОКОМ». Универсальный психодиагностический комплекс // Новый оборонный заказ. — 2011. — № 2 (14). — С. 83.
16. Григорьев Н. Н. Формы и эффективность Международной морской организации при борьбе с усталостью моряков / Н. Н. Григорьев, Д. Б. Сигаев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 506–515. DOI: 10/21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.
17. Романова Е. С. 99 популярных профессий. Психологический анализ и профессиограммы / Е. С. Романова. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2003. — 464 с.
18. Marine navigation and safety of sea transportation: STCW, maritime education and training (MET), human resources and crew manning, maritime policy, logistics and economic matters / edited by A. Weintrit, T. Neumann. — CRC Press, 2013. — 582 p.

REFERENCES

1. Sennet, R., and V. Suprun. *Korroziya kharaktera*. Fond «Trendy», 2014.
2. Grigor'ev, N., and M. Nakonechnyi. "Ot kul'tury bezopasnosti moreplavaniya k kul'ture ustupchivosti." *Morskoi flot* 03(1530) (2017): 24–27.
3. Grigor'ev, N., and M. Nakonechnyi. "Kontrol' bezopasnosti. V poiskakh panatsei." *Morskoi flot* 05(1539) (2018): 20–24.
4. Sargent, Clíodhna, Cormac Gebruers, and Jim O'Mahony. "A review of the physiological and psychological health and wellbeing of naval service personnel and the modalities used for monitoring." *Military Medical Research* 4.1 (2017): 1. DOI: 10.1186/s40779-016-0112-3.

5. Weintrit, Adam, ed. *Marine Navigation: Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017), June 21-23, 2017, Gdynia, Poland*. CRC Press, 2017.
6. Sharples, S., S. Shorrock, and P. Waterson, eds. *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2015: Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015, Daventry, Northamptonshire, UK, 13-16 April 2015*. CRC Press, 2015.
7. Hareide, Odd Sveinung, Runar Ostnes, and Frode Voll Mjelde. "Understanding the Eye of the Navigator." IEEE Aerospace & Electronic Systems Society, 2016.
8. Fan, Jialin, and Andrew P. Smith. "The impact of workload and fatigue on performance." *International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications*. Springer, Cham, 2017. 90–105. DOI: 10.1007/978-3-319-61061-0_6.
9. Weintrit, Adam, and Tomasz Neumann. *Human resources and crew resource management: Marine navigation and safety of sea transportation*. 1st Edition. London: CRC Press, 2011.
10. Smith, Andrew Paul, Paul Howard Allen, and Emma Jane Kirsty Wadsworth. *Seafarer fatigue: The Cardiff research programme*. Cardiff University, 2006.
11. Shafran, L. M., and V. V. Golikova. "Fiziologogigienicheskie osobennosti professional'noi deyatel'nosti moryakov spetsializirovannogo flota." *Ukrains'kii zhurnal z problem meditsini pratsi* 3 (2014): 29–39.
12. Afanasiev, Vladimir, Mikhail Nechaev, Svetlana Frolova, and Liudmila Shypovskaia. "Directions of Increasing the Effectiveness of Career Guidance System for Students in Russia." *Astra Salvensis* 12 (2018): 193–210.
13. Allen, Paul, and Andrew Paul Smith. "Communication on the bridge of a ship." *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2015: Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015, Daventry, Northamptonshire, UK, 13-16 April 2015*. CRC Press, 2015. 433–440.
14. Weintrit, Adam, and Tomasz Neumann. *Safety of Marine Transport: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. London: CRC Press, 2015.
15. "ZAO «NEIROKOM». Universal'nyi psikhodiagnosticheskii kompleks." *Novyi oboronnyi zakaz* 2(14) (2011): 83.
16. Grigoriev, Nikolay N., and Dmitrii B. Sigaev. "Forms and effectiveness of imo in seamen fatigue mitigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 506–515. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.
17. Romanova, E.S. *99 populyarnykh professii. Psikhologicheskii analiz i professiogrammy*. 2nd ed. SPb.: Piter, 2003.
18. Weintrit, Adam, and Tomasz Neumann, eds. *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: STCW, Maritime Education and Training (MET), Human Resources and Crew Manning, Maritime Policy, Logistics and Economic Matters*. CRC Press, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сигаев Дмитрий Борисович — аспирант
Научный руководитель: Григорьев Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru
Шатыло Александр Петрович — аспирант
Научный руководитель:
 Григорьев Николай Николаевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: shatyloksusha@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sigaev, Dmitrii B. — Postgraduate
Supervisor: Grigoriev, Nikolay N. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru
Shatylo, Aleksandr P. — Postgraduate
Supervisor:
 Grigoriev, Nikolay N.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: shatyloksusha@gmail.com, kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.
 Received: March 14, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-509-518

ASSESSMENT OF THE MAN-MADE INTERFERENCE IMPACT AT THE CONSTRUCTION OF CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEM OF THE RIVER LOCAL DIFFERENTIAL SUBSYSTEM GLONASS / GPS

A. A. Ivanova, S. F. Shakhnov, A. A. Butsanets

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

The influence of man-made interference on the differential correction signal generated by the reference stations (RS) based on the existing radio beacons in the frequency band 283.5-325.0 kHz at designing a control and management system (CMS) of the river local differential subsystem (RLDSS) GLONASS/GPS on inland waterways is considered in the paper. Since among the man-made interference the noises from corona discharges of high voltage power lines will have dominant effect on the differential correction signal, then when power lines pass near the boundaries of RS operation zones, the significant local discontinuities of the differential field may occur. In turn, the breach of the differential correction field integrity will lead to a decrease in the navigation safety on inland waterways at using the instrumental methods of pilotage. To calculate the noise immunity of the RS-vessel radio channel under the influence of man-made interference, a method based on calculating the error probability of piece-by-piece reception of a digital differential correction signal is used. The aim of the paper is to determine the assessment of the man-made interference impact on the differential field integrity by applying an algorithm for calculating the error probability. The algorithm includes the definition of signal energy in the radio channel with fluctuation and man-made noise in the absence of mutual interference. Exceeding the permissible magnitude of the error probability will signify the breach of the differential field integrity by the man-made interference impact and the appearance of local discontinuities of the field, where it is required to install additional remote control points. Thus, the use of this calculation algorithm minimizes the number of the remote control points, which is required when deploying the control and management system.

Keywords: river local differential subsystem, man-made interference, integrity monitoring, differential correction, power of interference, reference station, inland waterways, navigation safety.

For citation:

Ivanova, Aleksandra A., Sergei F. Shakhnov, and Artem A. Butsanets. "Assessment of the man-made interference impact at the construction of control and management system of the river local differential subsystem GLONASS / GPS." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 509–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-509-518.

УДК 656.629, 621.396

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЧНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС / GPS

А. А. Иванова, С. Ф. Шахнов, А. А. Буцанец

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

Рассматривается влияние промышленных помех на сигнал дифференциальной поправки, формируемый контрольно-корректирующей станцией в полосе частот 283,5–325,0 кГц при проектировании системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях. Поскольку среди промышленных помех преобладающее воздействие на сигнал дифференциальной поправки будут оказывать помехи от коронных разрядов линий электропередач, при прохождении последних вблизи границ зон действия контрольно-корректирующих станций могут возникать существенные локальные разрывы дифференциального поля. В свою очередь, нарушение целостности поля дифференциальной поправки приведет к снижению безопасности судоходства на внутренних водных путях

при использовании инструментальных методов проводки. Для расчета помехозащищенности радиоканала контрольно-корректирующая станция — судно в условиях воздействия промышленных помех используется метод, основанный на вычислении вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сигнала дифференциальной поправки. Целью работы является определение оценки влияния индустриальных помех на целостность дифференциального поля путем применения алгоритма расчета вероятности ошибки. Данный алгоритм включает определение энергетика сигнала в радиоканале с флуктуационным и индустриальным шумом в условиях отсутствия взаимных помех. Превышение допустимой величины вероятности ошибки будет означать нарушение целостности дифференциального поля в результате воздействия индустриальных помех и появление локальных разрывов поля, в местах возникновения которых требуется устанавливать дополнительные удаленные пункты контроля. Применение данного алгоритма расчета позволяет минимизировать количество удаленных пунктов контроля, необходимое при развертывании системы контроля и управления.

Ключевые слова: дифференциальная подсистема, индустриальные помехи, контроль целостности, дифференциальная поправка, энергетика помех, контрольно-корректирующая станция, внутренние водные пути, безопасность судоходства.

Для цитирования:

Иванова А. А. Оценка влияния индустриальных помех при построении системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС / GPS / А. А. Иванова, С. Ф. Шахнов, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 509–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-509-518.

Введение (Introduction)

Высокий уровень безопасности навигации и эффективности управления транспортными потоками на внутренних водных путях (ВВП) обеспечивают высокоточные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS. Высокая точность позиционирования на ВВП достигается за счет развертывания сети контрольно-корректирующих станций (ККС) речной локальной дифференциальной подсистемы (РЛДПС) ГНСС, работающих на границе средне- и длинноволнового диапазона в полосе частот 283,5–325,0 кГц.

Эффективность функционирования РЛДПС определяется не только высокой точностью позиционирования, достигающей метровых значений, но и обеспечением постоянной целостности дифференциального поля, формируемого ККС. На целостность поля оказывают влияние взаимные помехи от соседних ККС, индустриальные помехи, сезонные колебания электрических свойств подстилающей поверхности. В результате дальность действия ККС может варьироваться от 200 до 400 км, а целостность сплошного поля дифференциальной поправки может нарушаться, что приводит к снижению безопасности судоходства на ВВП и, соответственно, к необходимости создания системы контроля и управления (СКУ) РЛДПС, обеспечивающей непрерывный автоматический мониторинг целостности дифференциального поля и работоспособности элементов РЛДПС, в том числе с использованием методов математической обработки сигнала дифференциальной поправки, для чего необходимо разрабатывать математические методы учета влияния различных помех на качество приема этого сигнала.

Влияние взаимных помех на сигналы, передаваемые речными ККС, рассмотрено в источниках [1], [2], а воздействие подстилающей поверхности на распространение радиоволн диапазона частот 283,5–325,0 кГц — в источниках [2]–[4]. В данной работе рассматривается метод, позволяющий учитывать влияние индустриальных помех на сигнал ККС при проектировании СКУ РЛДПС на ВВП. Причем в источнике [1] установлено, что наличие различных помех и сильное влияние подстилающей поверхности на распространение радиоволн требуют создания разветвленной сети удаленных пунктов контроля (УПК), входящих в состав СКУ. Значительные размеры речных бассейнов требуют рациональной расстановки УПК при построении СКУ. Поэтому данная работа направлена на определение оценки влияния индустриальных помех на целостность дифференциального поля путем применения алгоритма расчета вероятности ошибки, который позволит уточнить количество УПК и их расположение для эффективного построения системы контроля и управления.

Методы и материалы (Methods and materials)

Промышленные помехи разделены на две группы: первая группа — высокочастотные синусоидальные помехи, имеющие наибольшую интенсивность в полосе частот 30–300 МГц, вторая группа — импульсные помехи, которые в полосе частот ниже 20 МГц представляют собой аperiodические импульсы произвольной формы [5], [6]. Поскольку РЛДПС работает в диапазоне частот 283,5–325,0 кГц, первая группа помех не будет оказывать существенного влияния на сигнал дифференциальной поправки. Промышленные помехи второй группы возникают от различных электрических установок, линий электропередач (ЛЭП), электрического транспорта, систем зажигания, медицинских и научных приборов, аппаратуры для дуговой сварки и т. д.

Измерения промышленных электромагнитных помех от различных типовых для промышленности аппаратов [7] показали, что излучаемый при их работе спектр концентрируется в областях частот 750 кГц и 3 МГц для дуговых сварочных аппаратов, 10–20 МГц для аппарата для склеивания древесины и 35 МГц и выше для аппаратов по свариванию пластмассы. Помехи от систем зажигания двигателей внутреннего сгорания или электродвигателей наиболее сильно проявляются в полосе частот 30–1000 МГц¹. Уровень радиопомех от электротранспорта имеет максимальное значение на частоте 150 кГц и убывает при увеличении частоты². На рис. 1 представлены квазипиковые значения напряженности поля радиопомех, создаваемых ЛЭП, в полосе частот 0,15 ... 30 МГц³ [5].

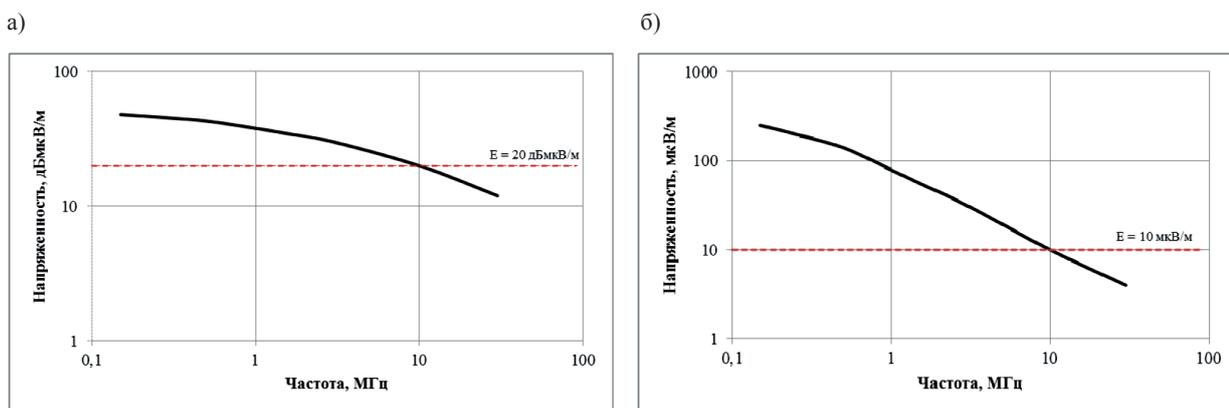


Рис. 1. Квазипиковые значения напряженности поля промышленных радиопомех, создаваемых ЛЭП, в децибелах относительно 1 мкВ/м (а) и в мкВ/м (б)

Согласно ГОСТ Р 54117–2010⁴, дифференциальная навигационная аппаратура потребителей (ДНАП) ГНСС должна обеспечивать прием сигналов поправок в динамическом диапазоне от 10 мкВ/м до 150 мВ/м, т. е. чувствительность судовых приемников ДГНСС должна быть не менее 10 мкВ/м (рис. 1, б) или 20 дБм·кВ/м (см. рис. 1, а). Из рис. 1 следует, что напряженность поля радиопомех от ЛЭП резко падает с ростом частоты. Поскольку радиоканал ККС – судно работает на частотах 0,3 МГц, радиопомехи, создаваемые ЛЭП, будут существенно превышать порог чувствительности судовых приемников ДГНСС. Так как основная энергия промышленных помех, создаваемых промышленными аппаратами и системами зажигания, сосредоточена в полосе частот, находящейся в стороне от полосы, выделенной для РЛДПС, преобладающее воздействие

¹ ГОСТ Р 51318.12–2012. Совместимость технических средств электромагнитная. Транспортные средства, моторные лодки и устройства с двигателями внутреннего сгорания. Характеристики промышленных радиопомех. Нормы и методы измерений для защиты радиоприемных устройств, размещенных вне подвижных средств. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

² ГОСТ 29205–91. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электротранспорта. Нормы и методы испытаний. М.: ИПК Изд-во стандартов, 6 с.

³ ГОСТ 22012–82. Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерений. М.: Изд-во стандартов, 1995. 7 с.

⁴ ГОСТ Р 54117–2010. Глобальные навигационные спутниковые системы. Морские дифференциальные подсистемы. Навигационная аппаратура потребителей. Технические характеристики, методы и требуемые результаты испытаний. М.: Стандартинформ, 2011. 28 с.

на сигнал дифференциальной поправки будут оказывать помехи от ЛЭП и контактных сетей электротранспорта. Вероятность прохождения поезда по железнодорожному мосту в момент прохода под ним судна значительно меньше единицы, поэтому при расчете вероятностных характеристик помехами от электротранспорта также можно пренебречь.

Радиопомехи от ЛЭП обусловлены коронными разрядами на изоляторах, проводах или арматуре, а также искрением, вызванным плохими контактами. Поскольку излучение от разряда в зазоре возникает в диапазоне высоких частот (от 1 МГц)¹, на сигнал, передаваемый по радиоканалу ККС – судно, оно влияния не оказывает. Поэтому для учета влияния промышленных помех на целостность дифференциального поля РЛДПС можно ограничиться рассмотрением промышленных помех от коронных разрядов ЛЭП.

Механизм образования короны заключается в ионизации и излучательной рекомбинации газов, окружающих клеммы высоковольтных ЛЭП [8]. Флуктуации тока короны создают последовательность радиоимпульсов. Частота импульсов изменяется линейно с током короны. Эти импульсы имеют быстрое время нарастания и короткую длительность [9]–[11]. Эффект короны существенно проявляется в линиях напряжением 220 кВ и выше [7]. При дожде ионизация более существенна, поскольку водяные капли сильно увеличивают неровности на проводе, способные вызвать разряды. Следовательно, при дожде потери на корону растут. Судовые приемники испытывают на себе влияние помех, вызываемых коронным разрядом, при движении судна по участку ВВП, на котором ЛЭП либо пересекает этот участок, либо проходит вблизи от него (рис. 2).

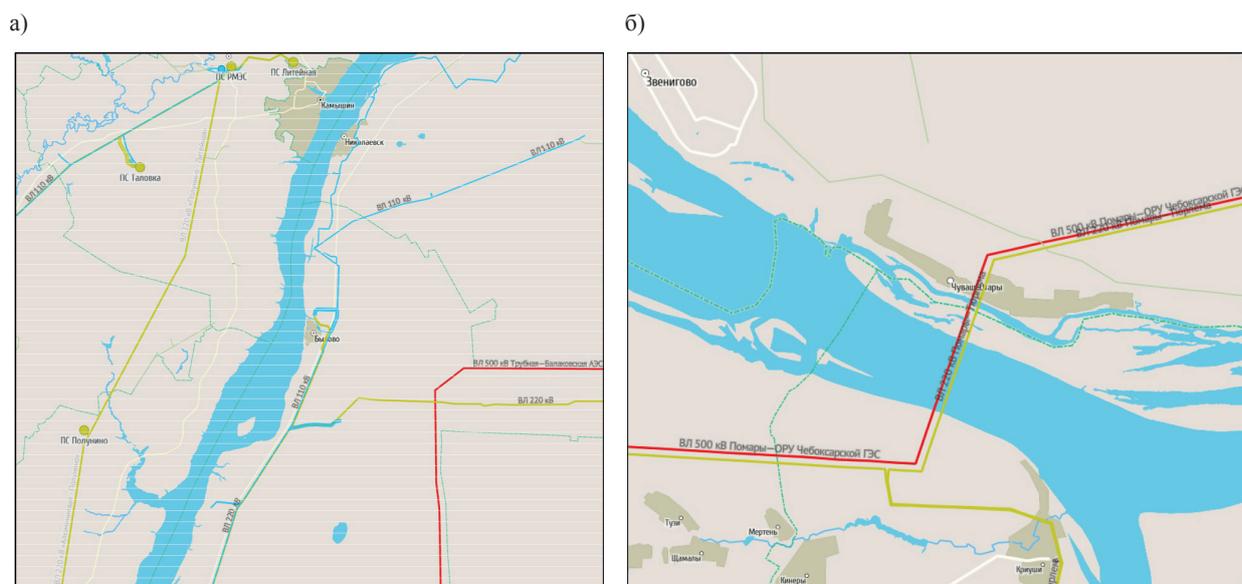


Рис. 2. Линии электропередач на двух участках: вдоль реки Волги (а) и пересекающие ее (б)

На рис. 2 показаны два участка реки Волги. На рис. 2, а представлена схема линий электропередач, проходящих вдоль реки мимо городов Камышин, Николаевск, Быково и Верхний Балыклей. Слева вдоль реки проходят воздушные линии (ВЛ) электропередач «Полунино–Литейная» и «Алюминиевая–Полунино» номиналами 220 кВ, расстояние от которых до Волги колеблется от 8 до 15 км на изображенном участке карты. С правой стороны от реки проходят ВЛ номиналами 110 кВ и 220 кВ. Причем, если в нижней части карты в районе города Быково и южнее минимальное расстояние от ВЛ до Волги составляет 1,5 км, то в северной части карты расстояние до реки не превышает 100 м на некоторых участках севернее города Николаевска, что может привести к влиянию радиопомех, создаваемых этой ЛЭП, на сигнал дифференциальной поправки, прини-

¹ РД 50-723–93. Методические указания. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от воздушных линий электропередачи и высоковольтного оборудования. Описание физических явлений. — М.: Изд-во стандартов, 1993. 132 с.

маемый судном, при прохождении данного участка реки. На рис. 2, б ВЛ «Помары–ОРУ¹ Чебоксарской ГЭС» и «Помары–Тюрлема» номиналами 500 кВ и 220 кВ, соответственно, пересекают водные пути в районе деревни Чуваш-Отары, помехи от которых в значительной степени будут оказывать влияние на радиоканал ККС – судно при прохождении последнего под ЛЭП. Поэтому в двух последних рассмотренных случаях требуется оценка влияния радиопомех от ЛЭП и принятие решения об установке дополнительных УПК.

Результаты (Results)

Затухание помех, распространяющихся вдоль ЛЭП, увеличивается в зависимости от повышения частоты. Этот эффект видоизменяет спектр, уменьшая уровень помех с увеличением частоты. Затухание поля помех от коронных разрядов ЛЭП определяется по формуле

$$E(D) = E_0 + 20k \lg \left(\frac{D_0}{D} \right), \quad (1)$$

где E — напряженность поля помехи на расстоянии D , дБ·мкВ/м; E_0 — напряженность поля помехи на расстоянии D_0 , дБ·мкВ/м; k — коэффициент затухания; D_0 — базисное расстояние, м.

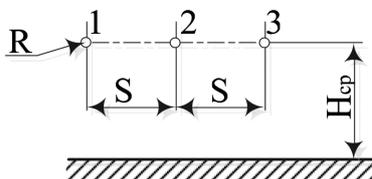


Рис. 3. Конфигурация ЛЭП с расположением проводов на одном уровне: 1–3 — провода ЛЭП; S — расстояние между фазами, м; H_{cp} — средняя высота провода над землей, м; R — радиус провода, мм

Согласно РД 50-723-93 для ЛЭП, проходящих по территории России, коэффициент затухания k принят $-1,6$ в полосе частот $0,15-30$ МГц, а базисное расстояние, на котором измеряется напряженность поля помехи, составляет 20 м.

В таблице представлены некоторые базисные значения напряженности поля радиопомех E_0 , создаваемых коронным разрядом отечественных ЛЭП с расположением проводов на одном уровне (рис. 3) при различных напряжениях U и погодных условиях.

Напряженность поля помех E_0 , создаваемых коронным разрядом ЛЭП на базисном расстоянии 20 м для ЛЭП с расположением проводов на одном уровне

Параметры ЛЭП					Напряженность поля помех E_0 на базисном расстоянии $D_0 = 20$ м, дБ·мкВ/м	
U , кВ	S , м	H_{cp} , м	R , мм	Количество проводов	При сильном дожде	При сухой погоде
110	6	18,3	8,75	1	53	33
220	5,78	14,8	12	1	73	53
330	9	20	12	2	77	57
	8,7	18,5	12	2	78	58
500	10,5	17,2	12,6	3	76	56
	14,8	21,9	13,75	3	72	52
750	16	21,4	14,7	4	85	65
	10,5	27,5	12,0	5	85	65

Представленные в таблице базисные значения напряженности поля радиопомех E_0 можно использовать для нахождения напряженности поля радиопомехи от коронного разряда на любом расстоянии D от источника помех по формуле (1). Например, исходя из таблицы, для ЛЭП напряжением 220 кВ базисная напряженность поля помехи $E_0 = 73$ дБ·мкВ/м и $E_0 = 53$ дБ·мкВ/м при дождливой и сухой погоде соответственно. Тогда, согласно формуле (1), профили радиопомех для ЛЭП данного номинала и текущей конфигурации будут иметь вид, представленный на рис. 4. Причем максимальной интенсивности радиопомехи от ЛЭП достигают при дожде, снегопаде, тумане и высокой относительной влажности. Повышенная турбулентность воздуха и солнечная активность в засушливых и пустынных районах также способствуют увеличению электромагнитных помех от ЛЭП.

¹ ОРУ — открытое распределительное устройство.

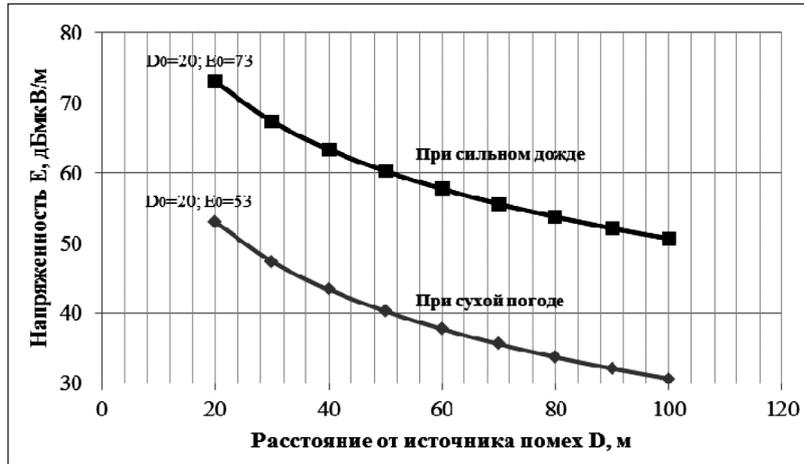


Рис. 4. Профили радиопомех для ЛЭП напряжением 220 кВ с расположением проводов на одном уровне

Суммарное колебание сигнала и помех, поступающее на вход приемного устройства, имеет вид [3]:

$$z'(t) = \mu z_r(t, \psi) + \sum_{i=1}^N \gamma_i(t) + \xi(t), \quad 0 \leq t < T, \quad (2)$$

где $r = 1, 2, \dots, m$; m — основание кода; μ — коэффициент передачи канала по сигналу или помехе; ψ — начальная фаза сигнала; $z_r(t, \psi)$ — полезный сигнал; $\gamma_i(t)$ — взаимная помеха от соседних ККС; N — число взаимных помех; $\xi(t)$ — аддитивная помеха в виде белого гауссовского шума (флуктуационный шум), которая непрерывно существует на выходе приемного устройства; T — период следования сигнала.

На рис. 5 представлен спектр коронного разряда, полученный экспериментальным путем на испытательных станциях [12]. Из приведенного на рисунке графика видно, что в интервале частот 0,1–1 МГц напряженность поля помех от коронного разряда ЛЭП практически постоянна и далее резко падает, поэтому в данном интервале частот такую радиопомеху также можно рассматривать как флуктуационный белый гауссовский шум $\xi_{cd}(t)$ со спектральной плотностью мощности ν_{cd}^2 . Тогда уравнение (2) примет вид

$$z'(t) = \mu z_r(t, \psi) + \sum_{i=1}^N \gamma_i(t) + \xi(t) + \xi_{cd}(t), \quad 0 \leq t < T, \quad (3)$$

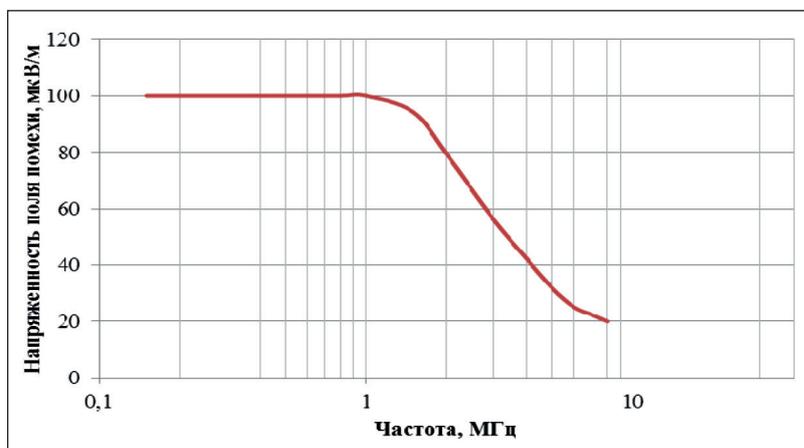


Рис. 5. Зависимость спектра поля радиопомех, снятая при искусственном коронном разряде, от частоты

Тогда для расчета помехозащищенности радиоканала ККС – судно можно использовать метод, основанный на вычислении вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сообщения (p_{err}) и описанный в источниках [1], [2]. При отсутствии взаимных помех p_{err} связана с энергетикой сигнала $h_{cd}^2(D)$ соотношением [13]:

$$p_{err} = -0,5 \exp \left[-\frac{h_{cd}^2(D)}{2} \right]. \quad (4)$$

При этом энергетика сигнала $h_{cd}^2(D)$ в радиоканале с флуктуационным шумом и помехой от коронного разряда будет определяться выражением

$$h_{cd}^2(D) = \frac{P_s T}{v_{cd}^2(D) + v^2}, \quad (5)$$

где P_s — мощность сигнала на входе приемника; $v_{cd}^2(D)$ — спектральная плотность шума от коронного разряда (индустриальной помехи); v^2 — спектральная плотность белого флуктуационного шума.

Мощность сигнала на входе приемника P_s определяется в виде

$$P_s = \frac{E^2(R) \cdot S_{eff}}{120\pi}, \quad (6)$$

где S_{eff} — эффективная площадь антенны; $E(R)$ — напряженность поля сигнала в точке приема в мкВ/м, вычисляемая в случае представления излучающей антенны ККС в виде точечного диполя в виде

$$|E(R)| = -\frac{3 \cdot 10^5 \sqrt{P_{tr}}}{R} w(R), \quad (7)$$

где P_{tr} — мощность передатчика, кВт; R — расстояние до точки приема, км; $w(R)$ — функция ослабления, вычисляемая посредством уравнения Файнберга либо уравнения Хаффорда (для сферической поверхности) [2], [4].

В результате, определив напряженность поля сигнала в точке приема по (7) и зная эффективную площадь антенны, можно, используя выражение (6), вычислить мощность сигнала на приеме. В связи с тем, что на частотах, в диапазоне которых работает ККС, спектральная плотность шума от коронного разряда $v_{cd}^2(D)$ практически постоянна, ее величина определяется выражением

$$v_{cd}^2(D) = P_{cd} \cdot \Delta f, \quad (8)$$

где P_{cd} — мощность помехи от коронного разряда на входе приемника; Δf — полоса частот сигнала.

P_{cd} находится по формуле (6), в которую необходимо подставить полученное из формулы (1) значение напряженности поля помехи от коронного разряда в расчетной точке водного пути $E(D)$ и эффективную площадь антенны, определенную на основании известных параметров антенно-фидерного тракта приемника. Входящее в формулу (1) базовое значение напряженности поля радиопомех E_0 выбирается из приведенной на с. 513 таблицы для ЛЭП соответствующего номинала и расположением проводов на одном уровне в условиях дождя (как наиболее худший вариант) либо из РД 50-723–93 для других конфигураций ЛЭП.

Таким образом, найденные значения мощности сигнала на приеме P_s , спектральной плотности шума от коронного разряда $v_{cd}^2(D)$, а также спектральной плотности белого шума v^2 позволяют определить энергетика сигнала $h_{cd}^2(D)$ по выражению (5) и затем, подставив полученное значение в выражение (4), вычислить вероятность ошибки поэлементного приема сообщения p_{err} в радиоканале с флуктуационным и индустриальным шумами при отсутствии взаимных помех. В результате, если полученная вероятность ошибки p_{err} окажется ниже допустимой, то помехозащищенность радиоканала считается обеспеченной, и УПК располагать не требуется.

Выводы (Summary)

1. В данной работе рассмотрена возможность учета влияния индустриальных помех на сигнал ККС при проектировании СКУ РЛДПС на ВВП. Проведенное исследование показало, что среди индустриальных помех существенное влияние на целостность поля дифференциальной поправки,

создаваемой ККС РЛДПС, оказывают радиопомехи от коронных разрядов ЛЭП. Такие помехи будут достигать максимальных значений в случае пересечения ЛЭП водных путей или при их близком расположении вдоль ВВП. В результате в указанных зонах возможны существенные локальные разрывы дифференциального поля, которые могут привести к снижению безопасности судоходства на ВВП. Поэтому для контроля поля в местах прохождения ЛЭП вблизи ВВП возникает необходимость установки дополнительных УПК.

2. Для учета влияния промышленных помех применен метод оценки целостности параметров дифференциальной подсистемы по критерию соответствия вероятности ошибки поэлементного приема ее допустимому значению. Разработан алгоритм расчета вероятности ошибки в условиях присутствия в радиоканале флуктуационных и промышленных помех.

3. Предложенная в работе оценка влияния промышленных помех позволяет посредством вычисления вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сообщения p_{err} уже на стадии проектирования СКУ выявлять места возможных локальных разрывов дифференциального поля, которые будут возникать вследствие воздействия промышленных помех, с целью их устранения посредством соответствующих организационных и технических решений. Это позволяет устанавливать дополнительные УПК только в тех местах, где, согласно алгоритму расчета помехи от ЛЭП при нормальных условиях, будут иметь существенную, но допустимую величину. Однако при ухудшении технических (старение изоляторов) или погодных (мощный грозовой фронт) условий велика вероятность превышения ими допустимых значений. Поэтому для контроля за целостностью дифференциального поля определяется необходимое количество УПК в зоне действия ККС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шахнов С. Ф.* Построение системы контроля дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS с использованием метода математической обработки параметров сигнала дифференциальной поправки / С. Ф. Шахнов, А. А. Агеева // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.
2. *Karetnikov V. V.* Construction Method of Telecommunication System for Corrective Information Distribution / V. V. Karetnikov, S. F. Shahnov, A. A. Ageeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 171. — Is. 1. — Pp. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012010.
3. *Шахнов С. Ф.* Помехозащищенность и устойчивость радиолиний речных дифференциальных подсистем ГНСС ГЛОНАСС/GPS: монография / С. Ф. Шахнов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — 170 с.
4. *Шахнов С. Ф.* Предпосылки создания системы контроля и управления речной дифференциальной подсистемой системы ГЛОНАСС/GPS / С. Ф. Шахнов, А. А. Иванова // Речной транспорт (XXI век). — 2018. — № 2 (86). — С. 53–56.
5. *Вишневецкий Ю. Г.* Инфокоммуникационные технологии электромагнитной защищенности информационных каналов в автоматизированных системах управления движением судов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ю. Г. Вишневецкий. — СПб.: СПбГУВК, 2008. — 391 с.
6. *Шахнов С. Ф.* Методологические основы построения помехоустойчивой речной дифференциальной подсистемы ГНСС ГЛОНАСС/GPS: диссертация ... д-ра техн. наук: 05.12.14 / Сергей Федорович Шахнов; [Место защиты: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова]. — СПб., 2015. — 287 с.
7. *Уайт Д. Р. Ж.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / Д.Р.Ж. Уайт. — М. «Сов. радио», 1977. — 352 с.
8. Линии электропередачи 345 кВ и выше: сб. трудов науч.-исследов. Ин-та энергетики США / Пер. с англ. В. В. Бургсдорфа. — М.: Энергия, 1980. — 408 с.
9. *Trichel G. W.* The mechanism of the negative point to plane corona near onset / G. W. Trichel // Physical Review. — 1938. — Vol. 54. — Is. 12. — Pp. 1078–1084. DOI: 10.1103/physrev.54.1078.
10. *Paillol J.* Negative corona in air at atmospheric pressure due to a voltage impulse / J. Paillol, P. Espel, T. Reess, A. Gibert, P. Domens // Journal of applied physics. — 2002. — Vol. 91. — Is. 9. — Pp. 5614–5621. DOI: 10.1063/1.1465124.

11. Карась В. И. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела / В. И. Карась, В. И. Голота, О. В. Болотов, Б. Б. Кадолин, Д. В. Кудин // Физика плазмы. — 2008. — Т. 34. — № 10. — С. 951–958.
12. Пелисье Р. Энергетические системы / Р. Пелисье. — М.: Высш. школа, 1982. — 568 с.
13. Шахнов С. Ф. К расчету помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы при использовании детерминированных сигналов и взаимных помех / С.Ф. Шахнов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 24–30.

REFERENCES

1. Shakhnov, Sergei F., and Aleksandra A. Ageeva. "Construction of control system of differential subsystem of GLONASS/GPS with use of the method of mathematical processing of signal parameters of differential correction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.
2. Karetnikov, V. V., S. F. Shakhnov, and A. A. Ageeva. "Construction Method of Telecommunication System for Corrective Information Distribution." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 171. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012010.
3. Shakhnov, S. F. *Pomekhozashchishchennost' i ustoichivost' radiolinii rechnykh differentsial'nykh podsystem GNSS GLONASS/GPS: monografiya*. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015.
4. Shakhnov, S. F., and A. A. Ivanova. "To the issue of formation of control and management system of the river differential subsystem of the global navigation satellite system GLONASS / GPS." *River transport (XXIst century)* 2(86) (2018): 53–56.
5. Vishnevskii, Yu. G. *Infokommunikatsionnye tekhnologii elektromagnitnoi zashchishchennosti informatsionnykh kanalov v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya dvizheniem sudov*. Dr. diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet vodnykh kommunikatsii, 2008.
6. Shakhnov, S. F. *Metodologicheskie osnovy postroeniya pomekhoustoichivoi rechnoi differentsial'noi podsystemy GNSS GLONASS/GPS*. Dr. diss. Sankt-Peterburg, 2015.
7. Uait, D. R. Zh. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i neprednamerennye pomekhi. Вып. 1. Obshchie voprosy EMS. Mezhsistemnye pomekhi*. М. «Sov. radio», 1977.
8. Burgsdorf, V. V., ed. *Transmission line reference book 345 KV and above*. New York: Electric Power Research Institute, 1975.
9. Trichel, G. W. "The mechanism of the negative point to plane corona near onset." *Physical Review* 54.12 (1938): 1078–1084. DOI: 10.1103/physrev.54.1078.
10. Paillol, J., P. Espel, T. Reess, A. Gibert, and P. Domens. "Negative corona in air at atmospheric pressure due to a voltage impulse." *Journal of applied physics* 91.9 (2002): 5614–5621. DOI: 10.1063/1.1465124.
11. Karas, V. I., V. I. Golota, O. V. Bolotov, B. B. Kadolin, and D. V. Kudin. "Specific features of radiation from a negative air corona operating in the trichel-pulse mode." *Plasma Physics Reports* 34.10 (2008): 879–884. DOI: 10.1134/S1063780X08100097.
12. Pelissier, Rene. *Les reseaux d'energie electrique*. Dunod, Paris, 1975.
13. Shakhnov, S. F. "To calculation of the noise-protection of the radio channels of river LDSS with the use of the deterministic signals and mutual disturbances." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 24–30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Александра Анатольевна —
 аспирант
 Научный руководитель:
 Шахнов Сергей Федорович
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: uid@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanova, Aleksandra A. —
 Postgraduate
 Supervisor:
 Shakhnov, Sergei F.
 Admiral Makarov State University of Maritime and
 Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
 Federation
 e-mail: uid@gumrf.ru

Шахнов Сергей Федорович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: shahnovsf@gumrf.ru

Буцанец Артем Александрович —
аспирант
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Shakhnov, Sergei F. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: shahnovsf@gumrf.ru

Butsanets, Artem A. —
Postgraduate
Supervisor:
Karetnikov, Vladimir V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 28 мая 2019 г.
Received: May 28, 2019.*

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533

RELIABILITY OF SHIPS HULLS WITH OVERALL RESIDUAL DEFORMATIONS

S. O. Baryshnikov, T. O. Karklina, V. B. Chistov

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

Reliability of a vessel hull that has total deflection or kink is discussed in the paper. This hull defect may cause the sudden failure regardless of ship service life. There are no allowable values of characteristics (maximum deflection point) for this defect. There are no statistical data either, indicating the eventual increment of the deflection point, leading to the absence of the possibility to evaluate the hull reliability by this parameter. However, it is known that the presence of this defect causes the emergence of additional bending factor and the change of safety factor coefficient, influencing the allowable values of deck and bottom residual thickness. The residual thickness changes, depending on their operation time, are given in the rules of Russian River Register (RRR) and Russian Maritime Register of Shipping. Besides, these rules contain the allowable values of deck and bottom residual thickness. On the basis of the above, the dependencies for determining the possibility of failures emergence in terms of the average residual thickness of sheets in the link group due to the total deflection of the hull are offered. The condition according to which the average residual thickness of sheets in the links group is less than the allowable value established by the RRR Rules for a ship hull without common deformations is taken for a failure. The dependencies to calculate the decks' or bottoms' working area loss in the presence of deflection/kink given value are suggested. That allows calculating the amendment for permissible value of the average residual thickness of sheets. To evaluate the deformed hull reliability, the method of maximum deflection/kink point determination plays an important role. The complexity of the task consists in the assignment of the residual deflection from the total one. A patent describing the residual deflected hull axis determination method, taking into account its curvature on the separate areas had been obtained by the authors of the paper. Based on this method, the dependencies to determine the maximum residual deflection/kink are offered. Thus, the opportunity to evaluate the reliability of the deformed hull depending on a given number of years of the vessel operation emerges.

Keywords: reliability, allowable wear, residual total deflection/kink, the deviation of the normal to the surface from the vertical, curvature of the plot.

For citation:

Baryshnikov, Sergei O., Tatyana O. Karklina, and Valentin B.Chistov. "Reliability of ships hulls with over allresidual deformations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.

УДК 620.165.29:629.5

НАДЕЖНОСТЬ КОРПУСОВ СУДОВ С ОБЩИМИ ОСТАТОЧНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов

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

Рассматривается надежность корпуса судна, имеющего общий прогиб или перегиб. Данный дефект корпуса может вызывать появление внезапного отказа независимо от продолжительности эксплуатации судна. Для этого дефекта отсутствуют допускаемые значения его основной характеристики (максимальной стрелки прогиба), а также отсутствуют статистические данные увеличения стрелки прогиба со временем, что исключает возможность оценивать надежность корпуса судна по этому параметру. Вместе с тем известно, что наличие данного дефекта вызывает появление дополнительного изгибающего момента и изменение коэффициента запаса прочности корпуса, оказывающего влияние на допускаемые значения остаточных толщин листов палубы и днища. Изменение остаточных толщин листов в зависимости от времени их эксплуатации известно, так как в Правилах Российского речного регистра и Российского морского регистра судоходства даны сведения о скоростях изнашивания листов палубы и днища.

Кроме того, в указанных Правилах приведены допускаемые значения остаточных толщин листов палубы и днища. На основании изложенного предлагаются зависимости для определения вероятности появления отказов по средней остаточной толщине листов в группе связей вследствие общего прогиба корпуса судна. За отказ принимается условие, в соответствии с которым средняя остаточная толщина листов в группе связей меньше допускаемого значения, установленного Правилами Российского речного регистра для корпуса судна без общих деформаций с учетом изменений, вызванных этими деформациями. Предложены зависимости для расчета потери работоспособной площади палубы или днища при наличии стрелки прогиба / перегиба заданной величины. Это позволит рассчитывать поправку на допускаемое значение средней остаточной толщины листов. Отмечается, что для оценки надежности деформированного корпуса судна важную роль играет способ определения максимальной стрелки прогиба / перегиба. Сложность задачи состоит в выделении остаточного прогиба из общего. Авторами статьи ранее был получен патент на способ определения остаточной изогнутой оси корпуса по кривизне на отдельных его участках. На основании этого способа предлагаются зависимости для определения максимального остаточного прогиба / перегиба, и таким образом, появляется возможность оценки надежности деформированного корпуса в зависимости от заданного числа лет эксплуатации судна.

Ключевые слова: надежность, допускаемый износ, остаточный общий прогиб / перегиб, отклонение нормали к поверхности от вертикали, кривизна участка.

Для цитирования:

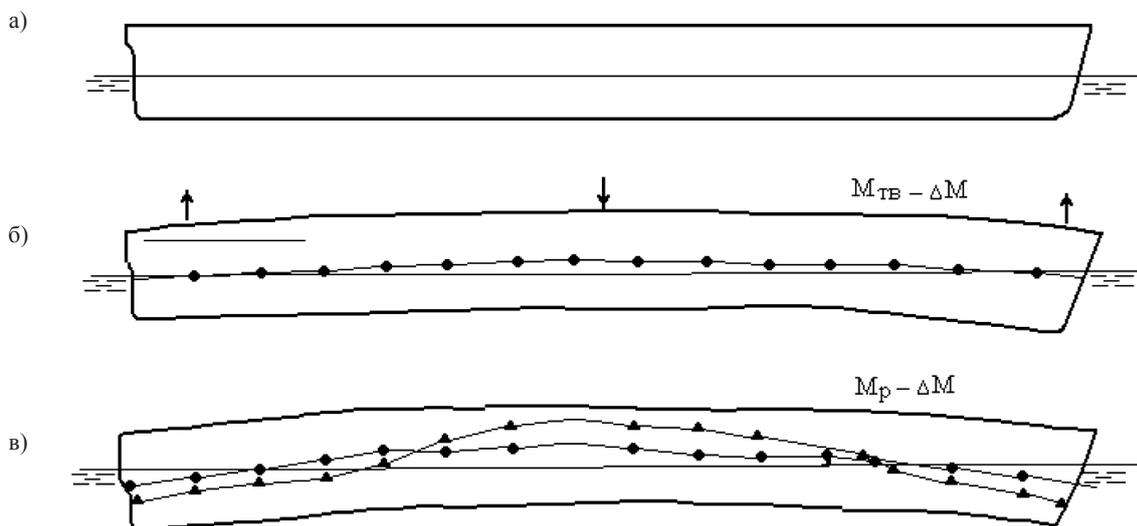
Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.

Введение (Introduction)

Корпуса судов внутреннего и смешанного плавания обычно имеют форму, отличающуюся от проектной. Если палуба растянута, а днище сжато, то имеет место остаточный перегиб, в противном случае — остаточный прогиб. Остаточные общие деформации (перегиб или прогиб) могут появляться в результате действия чрезмерных волновых нагрузок или нагрузок в процессе погрузки-выгрузки. Кроме того, они могут появляться из-за несовершенной технологии при постройке или ремонте судна, при перемещениях на судоподъемном сооружении спуске или подъеме.

Остаточный общий перегиб / прогиб не оказывает влияние на сопротивление воды движению судна, но усложняет судоподъемные работы, увеличивает осадку отдельных частей корпуса, не изменяет местную прочность, но оказывает влияние на общую прочность корпуса.

Появление остаточного общего перегиба (прогиба) приводит к возникновению дополнительного изгибающего момента, который может как уменьшать, так и увеличивать расчетный изгибающий момент [1]. Влияние общих деформаций на расчетный изгибающий момент показано на рис. 1.



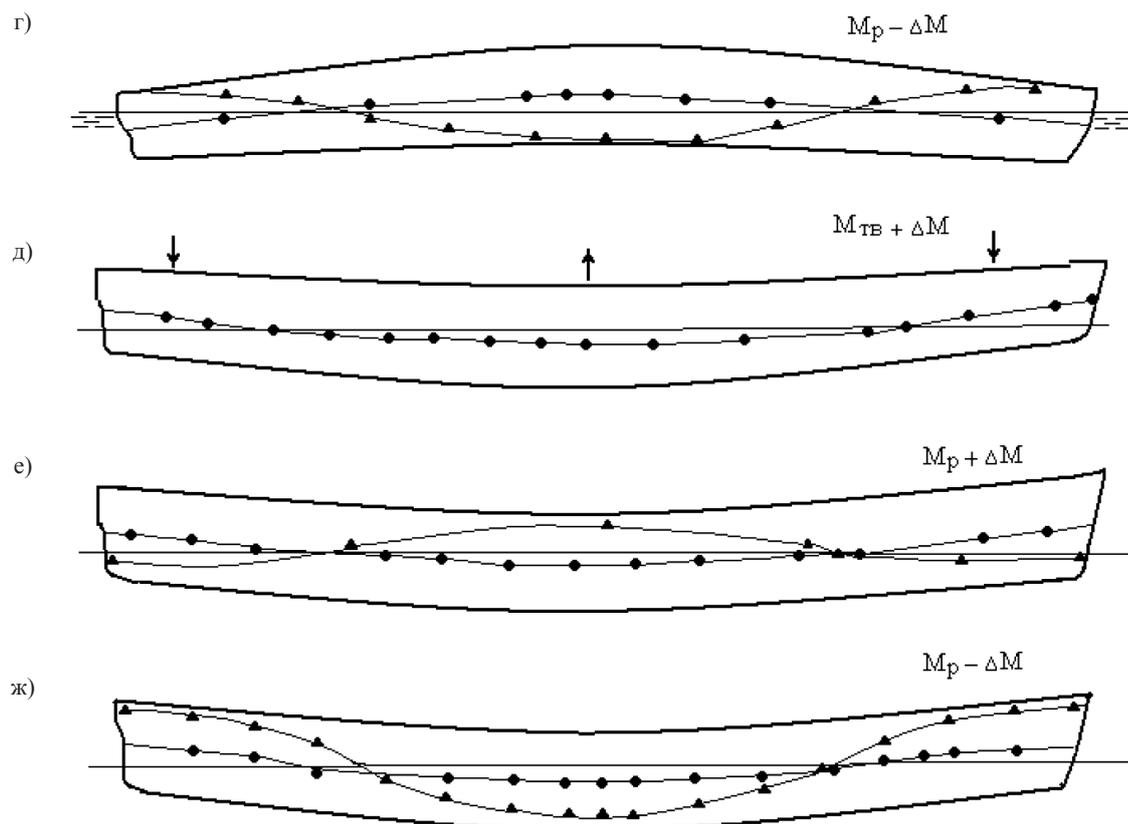


Рис. 1. Влияние общих остаточных деформаций на расчетный изгибающий момент:
a — корпус без деформаций, судно на тихой воде; *б* — корпус имеет перегиб, судно на тихой воде;
в — корпус имеет перегиб, судно на вершине волны; *г* — корпус имеет перегиб, судно на подошве волны;
д — корпус имеет прогиб, судно на тихой воде; *е* — корпус имеет прогиб, судно на вершине волны;
ж — корпус имеет прогиб, судно на подошве волны
 Условные обозначения:
 ●-----●-----● — изогнутая ось корпуса; ▲-----▲-----▲ — профиль волны

Методы и материалы (Methods and Materials)

Влияние изменения формы корпуса в процессе эксплуатации на обеспеченность его общей прочности из-за появления дополнительного изгибающего момента известно и отражено в учебниках и учебных пособиях [1], [2]. Однако в Правилах Российского речного регистра (далее — Правила РРР) остаточный общий перегиб / прогиб никак не оценивался, если отсутствовали признаки наметившегося перелома. Такое положение в Правилах РРР объяснялось двумя причинами: во-первых, сложностью определения остаточного общего перегиба / прогиба, который мог быть получен как разность между измеренным и упругим, рассчитанным по правилам строительной механики корабля для балки переменного сечения с неравномерной по длине нагрузкой; во-вторых, дополнительный изгибающий момент мог уменьшать расчетный момент и, следовательно, положительно влиять на обеспеченность общей прочности.

В начале 2000-х гг. профессором Г. В. Бойцовым была показана необходимость учета общего перегиба и предложено в связи с этим создать норматив для такого дефекта. Включение такого норматива в Правила РРР потребовало бы измерения дефекта при каждой дефектации и создания технологии ремонта корпуса в случае, если дефект превзойдет допускаемые значения. Так как получение общего перегиба / прогиба в большинстве случаев не исключает возможности дальнейшей эксплуатации судна (хотя оказывает влияние на обеспеченность общей прочности корпуса), было предложено не назначать нормативов, ограничивающих общий прогиб или перегиб, а дать указание каким образом следует учитывать общие остаточные деформации в расчетах общей прочности и определять минимальное значение этих деформаций, превышение которых требует учета

их в расчетах общей прочности. Одновременно было предложено нашему вузу принять участие в работе и создать технологические процессы измерения и устранения остаточного перегиба [9].

Практика эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания показывает, что корпуса крупных грузовых судов и барж имеют, как правило, перегиб, а стрелка остаточного перегиба может достигать 800 мм и более. Статистические данные о результатах измерений остаточного перегиба судов можно найти в работах [3]–[5].

Выражение для дополнительного изгибающего момента ΔM от общего остаточного прогиба / перегиба определим по формуле [1]:

$$\Delta M = \pm \beta k_{\alpha} B L^2 f_0, \quad (1)$$

где β — коэффициент, учитывающий гибкость корпуса, близкий к 1,0 ($\beta \leq 1$);

B, L — ширина и длина корпуса, соответственно, м;

f_0 — максимальная стрелка прогиба / перегиба, м;

k_{α} — коэффициент, зависящий от коэффициента полноты ватерлинии α (изменяется в пределах $k_{\alpha} = 0,05$ – $0,20$ и может определяться по графику на рис. 2 или по формуле (2)):

$$k_{\alpha} = \frac{n(n^3 + 5n + 10)}{48(n+2)(n+3)(n+4)}, \quad (2)$$

где $n = \alpha/1-\alpha$ — показатель степени в выражении для изменения ширины корпуса по его длине на заданной ватерлинии.

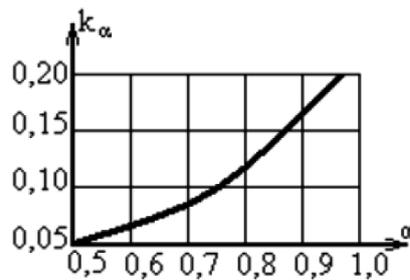


Рис. 2. График для расчета коэффициента k_{α}

Профессором Г. В. Бойцовым [6] было предложено учитывать влияние остаточных деформаций корпуса на общую прочность при величине остаточной стрелки прогиба / перегиба превышающей нормативное значение:

$$f_{0н} = L(R_{5\%} / E)(L / 15H), \quad (3)$$

где $R_{5\%}$ — предел текучести материала крайней связи, МПа;

E — модуль нормальной упругости стали, МПа;

H — высота борта корпуса на миделе, м.

Возникновение остаточного прогиба / перегиба сопровождается появлением в крайних связях корпуса остаточных напряжений, поэтому в источнике [6] при выполнении расчетов общей прочности корпусов, имеющих стрелку остаточных деформаций $f_{0н}$, нормативный коэффициент запаса прочности корпуса должен увеличиваться пропорционально коэффициенту

$$k_f = 1 + 0,1[(f_0 / f_{0н}) - 1] \geq 1. \quad (4)$$

При годном техническом состоянии корпуса, согласно Правилам РРР, должно выполняться условие общей прочности:

$$M_{пр.экспл} \geq K_{годн} \cdot M_p, \quad (5)$$

где $M_{пр.экспл}$ — предельный момент корпуса судна в эксплуатации, определенный с учетом износов и местных остаточных деформаций для прогиба и перегиба по абсолютной величине, кН·м;

M_p — расчетный изгибающий момент при прогибе и перегибе, взятый по модулю, кН·м;
 $K_{\text{годн}}$ — коэффициент запаса прочности.

Нормативные значения коэффициента запаса прочности приведены в таблице из правил технического надзора за судами в период эксплуатации в зависимости от класса судна.

Нормативные значения коэффициента запаса прочности

Класс судна	$K_{\text{годн}}$
«Л», «Р», «О», «М»	1,15
«О-ПР»	1,19
«М-ПР»	1,26
«М-СП»	1,27

Предельный момент корпуса судна в эксплуатации вычисляется по формуле

$$M_{\text{пр.экспл}} = 10^3 \cdot W_{\text{пр.экспл}} \cdot \sigma_{\text{оп}}, \quad (6)$$

где $W_{\text{пр.экспл}}$ — момент сопротивления рассматриваемого сечения корпуса, определенный с учетом имеющихся в связях в данный момент времени остаточных толщин и параметров деформаций в этом сечении исходя из предположения, что в одной из точек сечения напряжения равны опасным напряжениям относительно этой связи, м³;

$\sigma_{\text{оп}}$ — опасное напряжение в крайней связи, МПа;

Опасное напряжение в крайней связи принимается:

– для связей, не несущих местной нагрузки:

$$\sigma_{\text{оп}} = k_n R_{en}; \quad (7)$$

– для связей, несущих местную нагрузку:

$$\sigma_{\text{оп}} = 0,9k_n R_{en}, \quad (8)$$

$$\text{где } k_n = 1 - 0,089((R_{en} / 235) - 1) - 0,129((R_{en} / 235) - 1)^2. \quad (9)$$

Условие (5) для судна с общим остаточным перегибом или прогибом примет вид

$$M_{\text{пр.экспл}}^* \geq K_{\text{годн}} k_f (M_p + \Delta M), \quad (10)$$

где $M_{\text{пр.экспл}}^*$ — предельный момент корпуса судна, имеющего общий остаточный перегиб / прогиб.

Предельный момент корпуса судна, имеющего общий перегиб или прогиб будет определяться по формуле

$$M_{\text{пр.экспл}}^* = 10^3 (W_{\text{пр.экспл}} + \Delta W_{\text{пр.экспл}}) \sigma_{\text{оп}}. \quad (11)$$

где $\Delta W_{\text{пр.экспл}}$ — необходимое увеличение момента сопротивления корпуса для обеспечения общей предельной прочности, м³.

С учетом выражения (11) зависимость (10) можно представить в виде

$$10^3 W_{\text{пр.экспл}} \sigma_{\text{оп}} \left(1 + \frac{\Delta W_{\text{пр.экспл}}}{W_{\text{пр.экспл}}}\right) \geq K_r \cdot k_f \cdot M_p \cdot \left(1 + \frac{\Delta M}{M_p}\right). \quad (12)$$

Подставив значения из (5) и сократив, получим

$$1 + \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{W_{\text{пр}}} \geq k_f \left(1 + \frac{\Delta M}{M_p}\right). \quad (13)$$

В источнике [1] показано, например, что

$$\frac{\Delta W_{\text{пр}}}{W_{\text{пр}}} \approx \frac{\Delta F}{F}, \quad (14)$$

где ΔF — изменение площади крайней связи, относительно которой имеет место предельный момент сопротивления;

F — площадь этой крайней связи.

Тогда из выражения (13) после подстановки (14) и преобразований получим

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta M}{M_p} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{0н}} \right). \quad (15)$$

На рис. 3 показаны графики изменения относительного уменьшения работоспособной площади лимитирующей крайней связи корпуса в зависимости от отношения стрелки перегиба корпуса к нормативному ее значению по формуле (3). Это отношение не может быть меньше единицы, так как предложено учитывать перегиб в расчетах прочности, только в том случае, когда он превышает нормативные значения лимитирующей крайней связи. Полученная зависимость (15) оказывает влияние на надежность корпуса только для участка группы связей палубы или днища.

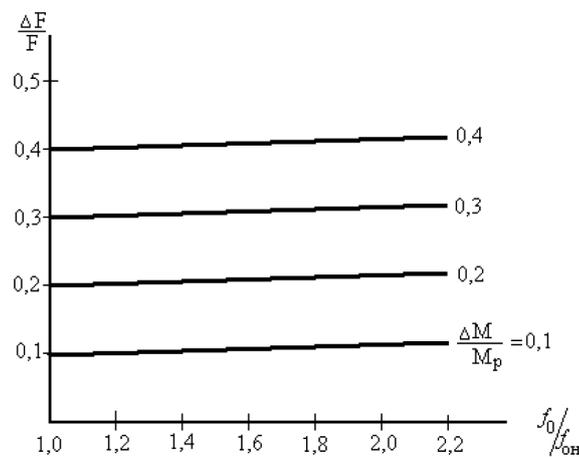


Рис. 3. Уменьшение работоспособной площади, лимитирующей крайней связи

Можно принять, что в каждом отдельном сечении (участке палубы или днища между бортами равном длине листа) скорости изнашивания листов настила или обшивки одинаковы и вероятность их появления (скоростей изнашивания) s_j подчиняется нормальному закону с характеристиками \bar{c} (средняя скорость изнашивания) и σ_c (стандарт скоростей изнашивания), заданными Правилами РРР или РМРС. В этом случае для палубы или днища судов внутреннего и смешанного плавания отказом будет условие, что средняя остаточная толщина в сечении $\bar{t}_{ост}$ меньше допустимой:

$$\frac{\sum t_{остi} b_i}{\sum b_i} < K \frac{\sum t_{прi} b_i}{\sum b_i} = [t_{сеч}], \quad (16)$$

где $t_{остi}$ — остаточная толщина i -го листа в сечении во время дефектации;

$t_{прi}$ — проектная толщина i -го листа в сечении;

b_i — ширина i -го листа в сечении;

K — коэффициент допускаемого сохранения средней проектной толщины для заданной группы связей по Правилам (РРР).

Если корпус судна имеет общие остаточные деформации, то допускаемая средняя остаточная толщина лимитирующей группы связей должна быть увеличена [15] и выражение (16) с учетом (15) примет вид

$$\frac{\sum_1^n t_{остi} b_i}{\sum_1^n b_i} < K \frac{\sum_1^n t_{прi} b_i}{\sum_1^n b_i} + \frac{\Delta F}{\sum_1^n b_i}. \quad (17)$$

Преобразовав выражение (17), получим значение допускаемого износа средней толщины крайней связи:

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = \frac{\sum_1^n (1-K)t_{\text{при}} b_i}{\sum_1^n b_i} - \frac{\Delta F}{\sum_1^n b_i}. \quad (18)$$

С учетом выражений (1), (3) и (15) получим

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \frac{f_0}{f_{0н}} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{0н}} \right), \quad (19)$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1-K) \frac{\sum_1^n t_{\text{при}} b_i}{\sum_1^n b_i}$ — допускаемый средний износ в сечении корпуса без общих остаточных деформаций;

$$A = \frac{\Delta M}{M_p \sum_1^n b_i} \quad \text{— коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих остаточных деформаций;}$$

ΔM_n — дополнительный изгибающий момент по формуле (1) при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному, согласно выражению (3).

Уменьшение средней остаточной толщины сечения впоследствии из-за износа через τ лет эксплуатации судна (год, для которого считается вероятность появления износа заданной величины) будет

$$\Delta t_{\text{сеч}} = \frac{\sum_1^n \tau_i c_i b_i}{\sum_1^n b_i}, \quad (20)$$

где n — количество листов в сечении группы связей;

τ_i — год службы элемента (листа) в сечении (наработка до настоящей дефектации).

Ранее было принято, что скорость изнашивания листов в сечении одинакова: $c_i = c_j$. Тогда выражение (20) примет вид:

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_i b_i}{\sum_1^n b_i}. \quad (21)$$

Если учесть, что период между очередными освидетельствованиями, а следовательно, между ремонтами, при которых листы в сечении могут быть заменены, составляет пять лет, то зависимость (21) можно представить в виде

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_i b_i}{\sum_1^n b_i} - c_j \frac{\sum_1^n (\tau_i - n'_i \cdot 5) b_i}{\sum_1^n b_i}, \quad (22)$$

где n_1 — количество замененных листов в сечении за τ_j лет эксплуатации;

n' — количество межремонтных периодов, которое отслужил лист до τ_j года службы судна.

Величина в скобках в выражении (22) не может быть отрицательна, а τ_j постоянна. Тогда после преобразования получим

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_j b_i}{\sum_1^n b_i} \left(1 - \frac{\sum_1^n b_i}{\sum_1^n b_i} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i b_i}{\sum_1^n \tau_j b_i} \right). \quad (23)$$

Выражение (23) можно еще упростить, если принять ширину листов во всем сечении одинаковой ($b_i = \text{const}$). Тогда

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \frac{\sum_1^n \tau_j b_i}{\sum_1^n b_i} \left(1 - \frac{n_i}{n} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i}{n_i \tau_j} \right) \quad (24)$$

или

$$\Delta t_{\text{сеч}} = c_j \tau_j A_1, \quad (25)$$

где $A_1 = \left(1 - \frac{n_i}{n} + 5 \frac{\sum_1^n n'_i}{n_i \tau_j} \right)$ — коэффициент среднего износа листов в сечении, учитывающий количество замененных листов и время их установки.

Вероятность уменьшения средней остаточной толщины из-за износа можно оценить интегралом вероятности по формуле

$$P(\Delta t_{\text{сеч}}) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t_{\text{сеч}} - \Delta \bar{t}_{\text{сеч}}}{\sigma_{\text{н}}} \right) \right), \quad (26)$$

где $\Delta \bar{t}_{\text{сеч}} = \bar{c}_j \tau_j A_1$ — математическое ожидание уменьшения средней остаточной толщины в группе связей;

$\sigma_{\text{н}} = \tau \sigma_c$ — среднеквадратическое отклонение уменьшения средней остаточной толщины (стандарт износа).

После преобразования получим

$$P(\Delta t_{\text{сеч}}) = \frac{1}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{\Delta t_{\text{сеч}}}{\tau \sigma_c} - \frac{1}{\nu} \right) \right), \quad (27)$$

где $\nu = \frac{\tau \sigma_c}{\bar{c}} = \frac{\sigma_c}{\bar{c}}$ — коэффициент вариации скоростей изнашивания, дан в Правилах РРР (получен в источнике [7]).

Используя зависимость (27), можно построить графики плотности вероятностей уменьшения средней остаточной толщины для днища или палубы в средней части и рассчитать вероятность безотказной работы после заданного числа лет эксплуатации [7] с учетом имеющихся общих остаточных деформаций. На рис. 4 показана номограмма для оценки надежности группы связей (обшивка днища) в сечении из одиннадцати листов корпуса судна класса М-СП после 30 лет эксплуатации.

Если в средней части корпуса в крайней группе связей имеет место n_1 сечений (участков корпуса, равных длине листа), то вероятность безотказной работы корпуса на этих участках группы связей будет

$$P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]) = \Pi_1^{n_1} P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}]), \quad (28)$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}]$ — допускаемый износ группы связей по (19);

$P_j(\Delta t_{\text{сеч}} \leq [\Delta t_{\text{сеч}}])$ — вероятность появления отказа в сечении.

Анализируя полученные зависимости и номограммы на рис. 4, видно, что для оценки надежности корпуса необходимо знать максимальную стрелку общей остаточной деформации корпуса [16], нахождение которой осложняется необходимостью исключить упругую составляющую. Авторами статьи был предложен и запатентован способ определения остаточной изогнутой оси корпуса по измеренной остаточной кривизне на отдельных участках [7]:

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_1^n c_i^{\text{ост}} (L - L_i)}{L} x - \sum \left(\frac{c_i^{\text{ост}} (x - (L_i - \frac{l}{2}))^2}{2} \Big|_{|x \geq (L_i - \frac{l}{2})} - \frac{c_i^{\text{ост}} (x - (L_i + \frac{l}{2}))^2}{2} \Big|_{|x \geq (L_i + \frac{l}{2})} \right), \quad (29)$$

где $y_{\text{ост}}^{(X)}$ — стрелка прогиба остаточной изогнутой оси корпуса на расстоянии X от кормового перпендикуляра;

$c_i^{\text{ост}}$ — остаточная кривизна на i -м участке корпуса;

l — длина участка, на котором измеряется кривизна (принимается кратной рамным шпациям и составляет 6–10 м);

L — длина корпуса судна между перпендикулярами;

L_i — расстояние от кормового перпендикуляра до середины i -го участка, на котором измерена кривизна:

$x \geq L_i - \frac{l}{2}$ и $x \geq L_i + \frac{l}{2}$ — показатели, указывающие на то, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение.

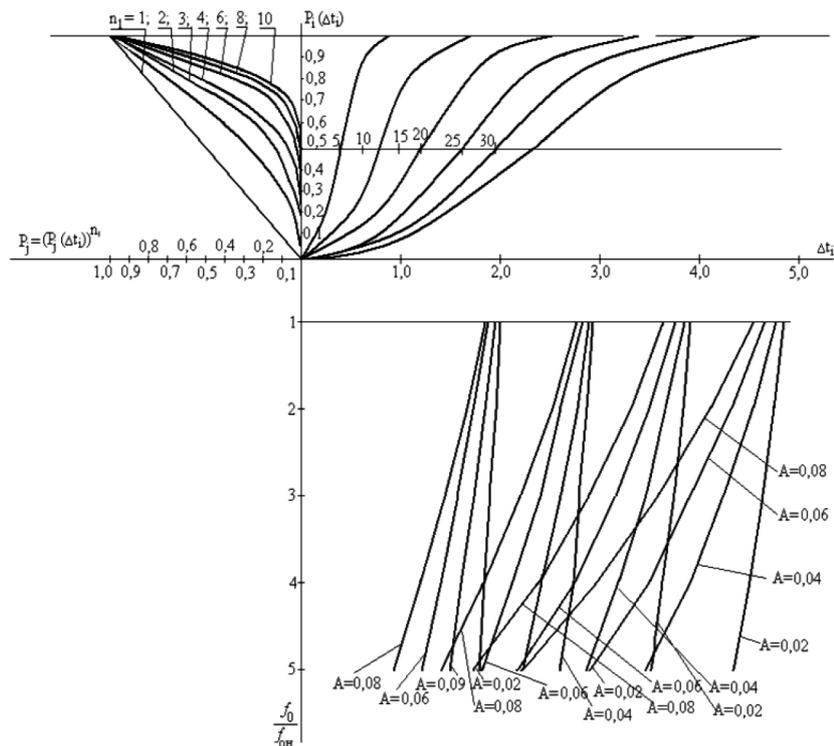


Рис. 4. Номограмма для оценки надежности деформированного корпуса судна

Формула (29) получена из рассмотрения дифференциальных зависимостей при изгибе балки, на которых основан графоаналитический способ определения перемещений. В этом случае прогиб в любой точке равен изгибающему моменту в сечении фиктивной балки под действием распределенной нагрузки, равной кривизне на отдельных участках.

Остаточную кривизну на отдельных участках корпуса судна можно определить по изменению отклонения нормали к поверхности от вертикали в начале и в конце участка как это показано на рис. 5. Кривизна на участке в данном случае будет определяться по формуле

$$C_{\text{изм}} = \frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\varphi}{l}. \quad (30)$$

Кривизна, вычисленная по формуле (30), будет включать в себя упругую составляющую, что, естественно, внесет погрешность в определение максимальной стрелки прогиба деформированного корпуса.

Если кривизна на участке меньше упругой, определяемой по формуле (31), то для определения остаточной стрелки прогиба она не должна учитываться. Этот участок следует считать прямолинейным:

$$c_y = \frac{1}{\rho} = \frac{10^3 M_{np}}{E J_{HO}} \quad (31)$$

где c_y — максимальная кривизна, исчезающая после снятия нагрузки от сил веса и сил поддержания корпуса;

$M_{np} = \sigma_T \cdot W_{np}$ — предельный изгибающий момент, кН·м;

σ_T — предел текучести материала крайней связи, МПа;

$W_{np} = \frac{J_{HO}}{H - y_{HO}}$ — момент сопротивления относительно крайней связи, где напряжения достигли

предела текучести материала;

J_{HO} — момент инерции площади поперечного сечения корпуса относительно нейтральной оси на рассмотренном участке, м⁴;

E — модуль нормальной упругости, МПа;

H — высота борта, м.

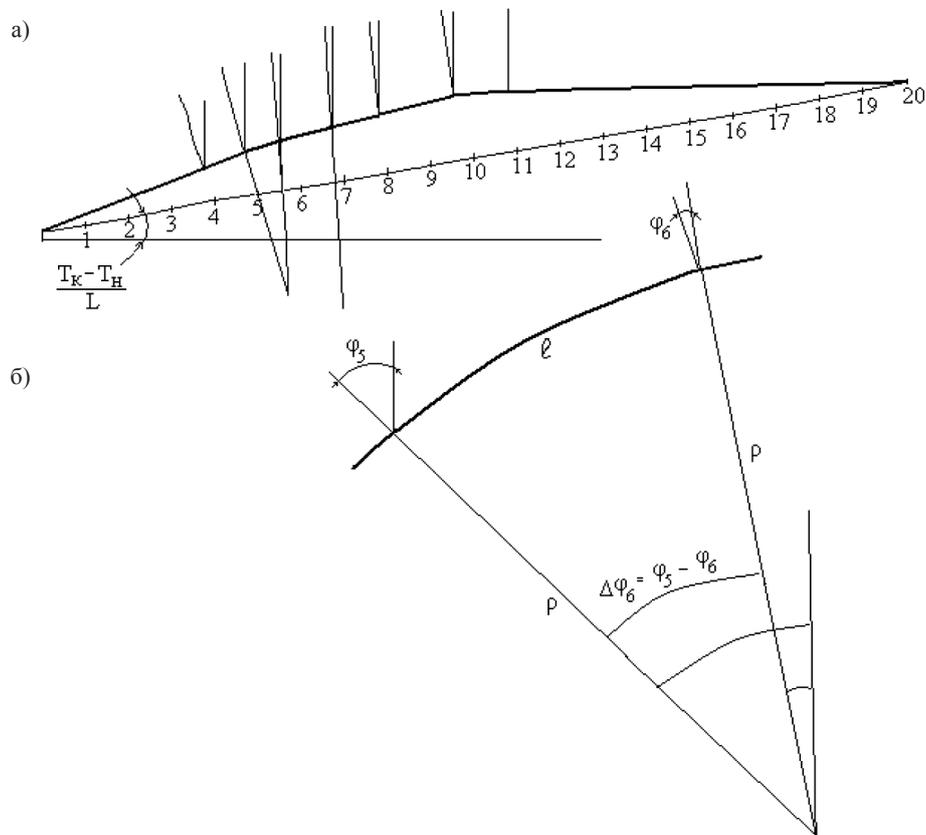


Рис. 5. Измерение кривизны на отдельных участках:
а — ось деформированного корпуса; б — определение кривизны на участке б

С учетом принятых обозначений после преобразований получим

$$c_y = \frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{1}{(H - y_{HO})} \quad (32)$$

Тогда, используя формулу (31), установим минимальное изменение угла на участке, которое следует учитывать при определении остаточного перегиба корпуса:

$$\Delta\varphi \geq \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{1}{(H - y_{HO})} \quad (33)$$

После подстановки реальных значений для материала корпуса и геометрических размеров поперечного сечения корпуса грузового судна внутреннего или смешанного плавания получим,

что изменение угла на заданном участке следует учитывать с точностью 0,1 град. Остаточная кривизна — равномерно распределенная нагрузка на участок фиктивной балки — запишется в виде

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - K'_i, \quad (34)$$

где $K'_i = c_y \frac{M^{(x)}}{M_{\text{пр}}}$ — уменьшение кривизны на участке из-за упругой составляющей.

На рис. 6 показан способ вычисления прогибов на участках корпуса (определение остаточной изогнутой оси). Сечение корпуса, в котором стрелка прогиба будет максимальной, определится из условия

$$\sum_1^n c_i^{\text{ост}} \cdot l \frac{L - L_i}{L} - \sum_1^n c_i^{\text{ост}} \cdot l = 0, \quad (35)$$

где L — длина корпуса, м;

$L_i = L_k + il$ — расстояние от кормового перпендикуляра до места измерения угла;

l — длина участка, на котором определяется отклонения нормали от вертикали, м;

$n = \frac{L - L_k - L_n}{l}$ — количество участков, на которых выполняется измерение отклонения нормали от вертикали;

где L_k и L_n — соответственно длина кормового и носового участка, на которых отсутствуют деформации, м;

n_1 — количество последовательно расположенных участков, с учетом которых выполняется условие (32).

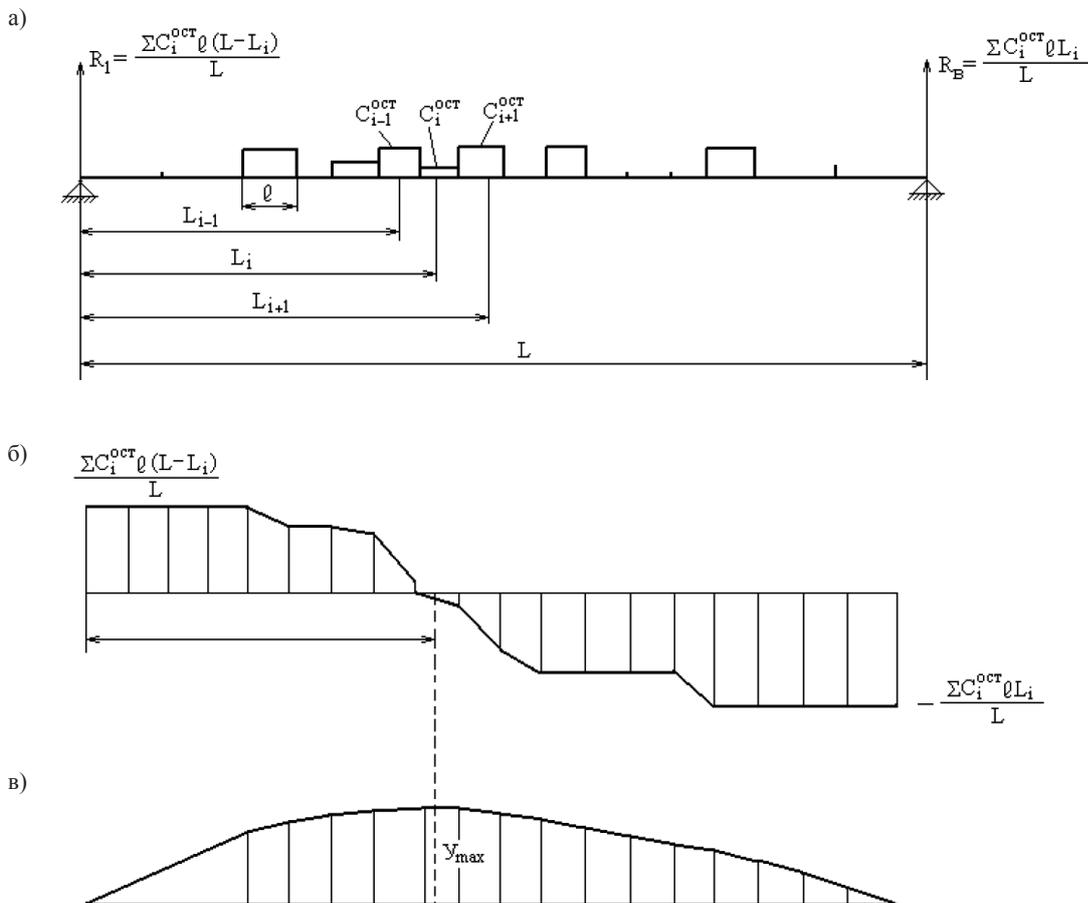


Рис. 6. Определение прогибов на участках корпуса
 а — фиктивная балка; б — эпюра изменения углов поворота;
 в — эпюра прогибов (изогнутая ось)

Расстояние от кормового перпендикуляра до сечения с максимальным прогибом / перегибом:

$$L_{\max} = L_k + n_1 l. \quad (36)$$

Условие (32) можно преобразовать, получив зависимость для нахождения n_1 :

$$\sum_1^{n_1} \Delta \varphi_i = \sum_1^n \Delta \varphi_i - \sum_1^n \Delta \varphi_i \frac{l_i}{L}. \quad (37)$$

После подстановки значения расстояния для максимального прогиба (L_{\max}) в выражение (29) получим значение максимального прогиба:

$$f_0 = \frac{\sum_1^n c_i^{\text{ост}} (L - L_i)}{L} \times \times L_{\max} \cdot \sum \left(\frac{c_i^{\text{ост}} \left(L_{\max} - \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{L_{\max} \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)} - \frac{c_i^{\text{ост}} \left(L_{\max} - \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{L_{\max} \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)} \right). \quad (38)$$

Чтобы исключить упругую составляющую не только на ранее выделенных прямолинейных участках, следует уменьшить кривизну корпуса также на изогнутых участках, приняв

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - c_{\text{упр}}, \quad (39)$$

где $c_i^{\text{изм}}$ — кривизна на участке, вычисленная по результатам измерения изменения угла отклонения нормали к поверхности от вертикали;

$c_{\text{упр}} = \frac{10^3 M_i^{\text{т.б}}}{E J_{\text{НО}}}$ — уменьшение кривизны в i -м сечении при разгрузке;

$M_i^{\text{т.б}}$ — изгибающий момент в i -м сечении от нагрузки во время измерения углов в кН·м;

E — модуль нормальной упругости стали, $2 \cdot 10^5$ МПа;

$J_{\text{НО}}$ — момент инерции поперечного сечения корпуса в средней части с учетом износов.

Необходимо учесть, что упругая составляющая измеряемой кривизны существенно меньше, чем максимальная упругая по формуле (29):

$$c_{\text{упр}} = \frac{10^3 M_i^{\text{т.б}}}{E J_{\text{НО}}} \frac{\sigma_{\text{т}}}{E} \cdot \frac{1}{H - y_{\text{НО}}}. \quad (40)$$

С небольшой ошибкой в безопасную сторону, получая несколько большее значение остаточной стрелки прогиба / перегиба, можно пренебречь упругой составляющей в кривизне деформированного участка и определять стрелку прогиба / перегиба f_0 по формуле (26), принимая $c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}}$. Таким образом, получены все необходимые зависимости для оценки надежности деформированных корпусов судов.

Результаты исследования (Research Result)

Получены зависимости, позволяющие оценивать надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями [14] после заданного числа лет эксплуатации с учетом выполненных ранее ремонтов и уточненных нормативов износов.

Допустимый износ палубы или днища определяется по формуле (19):

$$[\Delta t_{\text{сеч}}] = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \left(0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \right),$$

где $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1 - K)$ — допускаемый средний износ в сечении корпуса без общих остаточных деформаций;

A — коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих остаточных деформаций;

$\Delta M_{\text{н}}$ — дополнительный изгибающий момент по формуле (1) при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному по формуле (3);

$F_{0н}$ — нормативное значение прогиба / перегиба, превышение которого требует учета его в расчетах общей прочности корпуса;

f_0 — значение остаточного прогиба / перегиба корпуса.

Остаточный общий прогиб / перегиб по результатам измерений вычисляется по формуле

$$f_0 = \sum_1^n c_i^{ост} (L - L_i) \cdot (L_{max} / l) - 0,5 \sum_{|L_{max} \geq (L_i - 0,5l)} c_i^{ост} (L_{max} - (L_i - 0,5l))^2 - c_i^{ост} (L_{max} - (L_i + 0,5l))^2_{|L_{max} \geq (L_i + 0,5l)}.$$

Вероятность появления отказа в сечениях палубы или днища после τ_j лет эксплуатации определяется в виде

$$P_j(\Delta t_{сеч} \leq [\Delta t_{сеч}]) = \prod_1^n P_i(\Delta t_{сеч} \leq [\Delta t_{сеч}]),$$

где $\Delta t_{сеч}$ — средний износ в сечении;

$[\Delta t_{сеч}]$ — допускаемый средний износ в сечении;

n_1 — количество сечений палубы или днища (участков равных длине листа), в которых оценивается вероятность появления отказа;

$P_i(\Delta t_{сеч} \leq [\Delta t_{сеч}])$ — вероятность появления отказа в сечении.

Использование полученных зависимостей позволяет прогнозировать надежность корпусов после заданного числа лет эксплуатации, обосновывать объем и способы ремонта корпуса, устанавливать срок службы элементов и корпуса судна в целом.

Заключение (Conclusion)

Остаточный общий прогиб / перегиб оказывает влияние на общий прочность корпуса, чем снижает характеристики его надежности. Данный дефект не вызывает появление внезапного отказа. Снижение надежности происходит за счет уменьшения допускаемого значения средней остаточной толщины палубы и днища, которая уменьшается пропорционально известным скоростям изнашивания, распределенным по нормальному закону. Получены зависимости, позволяющие рассчитывать показатели надежности, деформированного корпуса судна после заданного числа лет эксплуатации и вычислять его остаточную стрелку прогиба по измеренной кривизне на отдельных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистов В. Б. Технология ремонта корпусов судов: конспект лекций / В. Б. Чистов. — Л.: ЛИВТ, 1978.— 78 с.
2. Лопырев Н. К. Технология судоремонта / Н. К. Лопырев, П. П. Немков, Ю. В. Сумеркин. — М.: Транспорт, 1981.— 285 с.
3. Карклина Т. О. Технологические методы стабилизации метрологических характеристик танкеров: дис. ... канд. техн. наук / Татьяна Осиповна Карклина. — Л.: СПБГУВК, 1991.— 155 с.
4. Анализ возможных причин появления общих остаточных деформаций корпуса: отчет по договору № ЦПР-05-31-07; рук. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 48 с.
5. Нормирование остаточных перегибов корпусов судов. Обоснование ограничений, вводимых Речным регистром на величину максимальных остаточных деформаций общего перегиба корпусов судов: отчет по договору № 143/17/31/09/1701/ ВГУВТ; рук. канд. техн. наук, проф. С. Н. Гириин. — Новгород, 2018. — 79 с.
6. Разработка предложений и расчетных зависимостей для учета остаточных прогибов (перегибов) при расчетах общей прочности, а также мероприятий, ограничивающих их появление: отчет по договору № ЦПР-05-31-07(этап 2); рук. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов.—СПб., 2005. — 56 с.
7. Анализ нормативов скоростей изнашивания связей и остаточных деформаций. Корректировка правил РРР: отчет по договору № ЦРП-04-33-09; рук. Ю. И. Ефименков. — СПб., 2005. — 85 с.
8. Пат. 2435149 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; заяв. и патентообл. СПГУВК. — № 2010106960/28; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33.

9. Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов / ФГОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный университет водных коммуникаций; рук. С. О. Барышников, отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов. Согласов. ФГУ Российский речной регистр. Письмо 07-06-450 от 21.02.2012. — СПб., 2011. — 201 с.

10. *Chistov V. B. Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls / V. B. Chistov, S. O. Baryshnicov, N. I. Gerasimov, V. A. Zhukov // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.*

11. *Барышников С. О. Надежность механизмов корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погадаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.*

12. *Гирин С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гирин, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С.18–26.*

13. *Карклина Т. О. Замена сливных каналов теплохода «Невский» на плаву / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 23–31.*

14. *Ефименков Ю. И. Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания R2-RSN(4,5) / Ю. И. Ефименков [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С.41–43.*

15. *Ефименков Ю. И. Устранение остаточного перегиба корпуса теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Сборник научных трудов ЦНИИМФ. — 2015. — № 1. — С. 117–125.*

REFERENCES

1. Chistov, V. B. *Tekhnologiya remonta korpusov sudov. Konspektleksii*. L.: LIVT, 1978.
2. Lopyrev, N. K., P. P. Nemkov, and Yu.V. Sumerkin. *Tekhnologiya sudoremonta*. M.: Transport, 1981.
3. Karklina, T. O. *Tekhnologicheskie metody stabilizatsii metrologicheskikh kharakteristik tankerov*. PhD diss. L.: SPGUVK, 1991.
4. *Analiz vozmozhnykh prichin poyavleniya obshchikh ostatochnykh deformatsii korpusa*. Otchet po dogovoru № TsPR-05-31-07. Rukovoditel' d.t.n., prof. G. V. Boitsov. Sankt-Peterburg, 2005.
5. *Normirovanie ostatochnykh peregibov korpusov sudov. Obosnovanie ogranichenii, vvodimykh Rechnym Registrom na velichinu maksimal'nykh ostatochnykh deformatsii obshchego peregiba korpusov sudov*. Otchet po dogovoru № 143/17/31/09/1701/. Novgorod, 2018.
6. *Razrabotka predlozhenii i raschetnykh zavisimostei dlya ucheta ostatochnykh progibov (peregibov) pri raschetakh obshchei prochnosti, a takzhe meropriyatii, ogranichivayushchikh ikh poyavlenie*. Otchet po dogovoru № TsRP-05-31-07(etap 2). Rukovoditel' d.t.n., prof. G.V. Boitsov. Sankt-Peterburg, 2005.
7. *Analiz normativov skorostei iznashivaniya svyazei i ostatochnykh deformatsii. Korrektirovka pravil RRR*. Otchet po dogovoru № TsRP-04-33-09. SPb., 2005.
8. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina, and V. B. Chistov. RU 2 435 149 C1, IPC G 01 M 5/00. Sposob opredeleniya ostatochnogo prodol'nogo izgiba korpusa sudna. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2011.
9. *Tekhnologicheskaya instruksiya po ustraneniю u ostatochnogo peregiba korpusov sudov*. SPb., 2011.
10. Chistov, Valentin B., Sergey O. Baryshnicov, Nikolay I. Gerasimov, and Vladimir A. Zhukov. "Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls." *2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS)*. IEEE, 2018. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937
11. Baryshnikov, S. O., L. I. Pogadaev, and V. B. Chistov. *Nadezhnost' mekhanizmov korpusov sudov. Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2018.
12. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu.I. Efimenkov. "General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 18–26.
13. Karklina, Tatyana Osipovna, Anatoliy Vladimirovich Pavlov, and Valentin Borisovich Chistov. "Replacement of drain passages of motorship "Nevskiy" afloat." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 23–31.

14. Efimenkov, Yu. I., M. A. Kuteinikov, G. V. Markozov, and S. A. Sotekov. "Osnovnye rezul'taty razrabotki trebovaniy k sudam ogranichenogo raiona plavaniya R2-RSN(4,5)." *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo Morskogo registra sudokhodstva* 36 (2013): 41–43.

15. Efimenkov, Yu.I., A.V. Pavlov, and V.B. Chistov. "Ustranenie ostatochnogo peregiba korpusa teplokhoda «Volgo-Don 225»." *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIMF* 1 (2015): 117–125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru
Карклина Татьяна Осиповна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: karklinato@gumrf.ru
Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergei O. —
Dr. of Technical Sciences, professor, rector
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru
Karklina, Tatyana O. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: karklinato@gumrf.ru
Chistov, Valentin B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 24 декабря 2018 г.
Received: December 24, 2018.*

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION OF POLYURETHANE ELASTOMERS APPLIED IN THE SHIP'S SHOCK-ABSORBERS

A. A. Chernysh¹, S. N. Yakovlev²

¹ — St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

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

The necessity of using shock-absorbers in modern shipbuilding in order to increase the resource of a depreciable object and its reliability is substantiated. The aim of the work is an experimental study of the deformability of new elastomeric materials used as shock-absorbing material as a vibration-insulating material. It is noted that vibration isolation will be more effective when the co-ratio of the frequencies of forced vibrations and the natural frequency of the system is greater than 5. Polyurethanes with a hardness of 40–45 ShA are used as an elastomeric material in advanced industrialized countries. The polyurethane of the firm “Synair” (USA) which is a cellular structure with arbitrarily located and isolated from each other cavities with a diameter of 0.8–1.5 mm is chosen for the experimental study. The most common types of shock-absorbers with various contact conditions of the vibration-insulating array with supporting plates are presented. The conditions of contacting the polyurethane array with the supporting plates are the first factor determining his deformation. The empirical data on the deformation of the polyurethane array, depending on the various boundary conditions are presented in the paper. An important factor that determines the deformation of the polyurethane array is also considered; it is a form factor, which is defined as the ratio of the area of the supporting surface to the area of the free side surface. A loading device, which is used to measure the samples deformation of cylindrical and rectangular forms, is presented in the paper. Empirical dependences to determine the modulus of elasticity at compression in a product, in particular, in a shock-absorber, depending on the contact conditions at the ends and on the shape factor of the vibration-insulating array are given. The obtained calculated empirical dependences allow us to calculate the sludge damper system at the design stage, which must be taken into account when centering the output shafts of power units.

Keywords: shock-absorber, polyurethane elastomer, frequency of forced vibrations, natural frequency, contact conditions, form factor, shock-absorber draft.

For citation:

Chernysh, Aleksandr A., and Stanislav N. Yakovlev. “An experimental study of the deformation of polyurethane elastomers applied in the ship’s shock-absorbers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 534–542. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-534-542.

УДК 62-752.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОВЫХ АМОРТИЗАТОРАХ

А. А. Черныш¹, С. Н. Яковлев²

¹ — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Обоснована необходимость применения амортизаторов в современном судостроении с целью увеличения ресурса амортизируемого объекта и повышения его надежности. Целью работы является экспериментальное изучение деформативности новых эластомерных материалов, применяемых в качестве виброизоляционного материала амортизаторов. Отмечено, что виброизоляция будет эффектив-

нее, когда соотношение частот вынужденных колебаний и частоты собственных колебаний системы будет больше пяти. В качестве эластомерного материала в передовых промышленно-развитых странах для этих целей используются полиуретаны твердостью 40–45 ShA. Для экспериментального исследования был выбран полиуретан фирмы «Supair» (США), представляющий собой ячеистую структуру с произвольно расположенными и изолированными друг от друга полостями диаметром (0,8–1,5 мм). Представлены наиболее распространенные на сегодняшний день типы амортизаторов с различными условиями контакта виброизоляционного массива с опорными пластинами. Условия контактирования полиуретанового массива с опорными пластинами являются первым фактором, определяющим его деформативность. В работе представлены эмпирические данные по деформированию полиуретанового массива в зависимости от различных краевых условий. Рассмотрен также важный фактор, определяющий деформацию полиуретанового массива — фактор формы, который определяется как отношение площади опорной поверхности к площади свободной боковой поверхности. В работе представлено нагружающее устройство, с помощью которого проводились замеры деформации образцов цилиндрической и прямоугольной формы. Приведены эмпирические зависимости по определению модуля упругости при сжатии в изделии, в частности в амортизаторе, в зависимости от условий контактирования на торцах и фактора формы виброизоляционного массива. Полученные расчетные эмпирические зависимости позволяют рассчитать осадку амортизатора на стадии проектирования, что необходимо учитывать при центровке выходных валов силовых агрегатов.

Ключевые слова: амортизатор, полиуретановый эластомер, частота вынужденных колебаний, частота собственных колебаний, условия контактирования, фактор формы, осадка амортизатора.

Для цитирования:

Черныш А. А. Экспериментальное исследование деформативности полиуретановых эластомеров, применяемых в судовых амортизаторах / А. А. Черныш, С. Н. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 534–542. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-534-542.

Введение (Introduction)

В современном судостроении наблюдается тенденция к повышению единичной мощности и быстроходности механизмов, что обуславливает повышение динамических нагрузок и возрастание роли колебательных явлений в работе механизмов. Вибрационное состояние определяет ресурс и надежность механизма, поэтому обеспечение низкого уровня вибраций как отдельных элементов, так и всего механизма представляет проблему первостепенной важности.

Наиболее распространенным и эффективным методом снижения уровня вибрации является виброизоляция — снижение уровня вибрации защищаемого объекта путем превращения энергии механических колебаний в другие виды энергии, в частности в тепловую, за счет большого внутреннего трения в виброизоляционном массиве амортизатора. До последнего времени в качестве виброизоляционного материала в большинстве амортизаторов использовалась резина. Основным недостатком резиновых амортизаторов является их недолговечность. Со временем они становятся жестче (старение) и через 5– лет их необходимо заменять. Кроме того, с их помощью нельзя получить низкие собственные частоты колебаний системы (< 5 Гц), которые необходимы для тихоходных агрегатов.

В передовых промышленно-развитых странах последние полвека традиционный эластомерный материал (резину) заменяют полиуретановыми эластомерами. Для полиуретанов, как и для резин, свойственно большое внутреннее трение, способное поглощать кинетическую энергию амортизируемого объекта. При этом полиуретан нагревается и рассеивает определенную часть энергии в виде тепла в окружающую среду (диссипация). Для современных полиуретановых эластомеров, согласно [1]–[3], свойственны высокие физико-механические свойства, большой диапазон твердости и эластичности, а также широкий рабочий диапазон: от – 35 °С до + 75 °С.

Целью данной работы является экспериментальное изучение деформативности новых для отечественной промышленности полиуретановых эластомеров, используемых для изготовления амортизаторов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Полиуретановые эластомеры используются для виброизоляции различных механизмов. Целью виброизоляции является создание таких условий на пути распространения колебаний, которые увеличили бы необратимые потери, тем самым уменьшив энергию, передаваемую от колеблющегося механизма на конструкцию в целом. Схема, демонстрирующая данный принцип виброизоляции, приведена на рис. 1. При разработке мероприятий по виброизоляции следует добиваться того, чтобы амплитуда колебаний, проходящих через амортизатор, была как можно меньше.

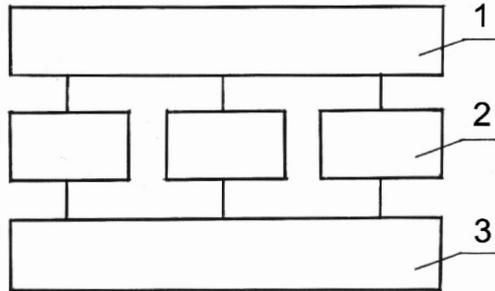


Рис. 1. Принципиальная схема виброизоляции:
1 — источник вибраций; 2 — амортизаторы;
3 — конструкция

Механизм, установленный на амортизаторы, в общем случае представляет собой колебательную систему с шестью степенями свободы. Механизмы, у которых гармоническая возмущающая сила имеет вертикальное направление и приложена к точке, находящейся на одной вертикали с центром тяжести, можно рассматривать как колебательную систему с одной степенью свободы.

Согласно источнику [4], способность амортизатора гасить колебания характеризуется коэффициентом виброизоляции η , который определяется согласно следующему выражению:

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2 \frac{4\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2 \frac{4\vartheta^2}{4\pi^2 + \vartheta^2}}}, \quad (1)$$

где f_B — частота вынужденных колебаний (частота колебаний возбуждающей силы), Гц; f_c — частота собственных колебаний системы агрегат-полиуретан, Гц; ϑ — логарифмический декремент затухания колебаний виброизолирующей системы.

Проанализировав выражение (1), можно заметить, что виброизоляция будет тем лучше, чем больше соотношение частот вынужденных колебаний и частоты собственных колебаний системы, которую определяют, в первую очередь, физико-механические свойства полиуретанового эластомера, используемого в качестве конструкционного материала для виброизоляционного массива амортизатора.

Частота вынужденных колебаний механизма определяется условиями его работы. При этом она является величиной заданной и находится в диапазоне наиболее широко применяемых механических колебаний — от 10 до 50 Гц. Таким образом, для увеличения соотношения частот $\frac{f_B}{f_c}$ необходимо снижать частоту f_c , применяя для этой цели новые материалы.

В настоящее время на рынке виброизоляционных материалов появился новый для отечественной промышленности полиуретановый эластомер фирмы «Synair» (США). Этот материал представляет собой ячеистую структуру с произвольно расположенными и изолированными друг от друга полостями малого диаметра (0,8–1,5 мм). Данный полиуретановый эластомер, согласно

источнику [5], относится к материалам малой ($< 45 \text{ ShA}$) твердости, для которого свойственны следующие отличительные особенности:

- высокая стойкость к воздействию масел и дизельного топлива;
- высокая усталостная прочность;
- отсутствие видимого старения (изменение физико-механических свойств во времени) в течение 10 лет;
- увеличенная площадь теплоотдачи, что особенно важно для работы виброизоляционного материала амортизатора.

Данный полиуретановый эластомер производится твердостью 40 и 45ShA и служит для изготовления амортизаторов малой жесткости, в основном для амортизации точного оборудования с низкой собственной частотой порядка 3–6 Гц.

В судостроительной промышленности на сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие типы амортизаторов:

1. Сварные резиноталлические амортизаторы, представляющие собой неразборное изделие с резиновым виброизоляционным массивом, привулканизированным, или «приваренным» к металлическим деталям.

2. Сборные амортизаторы, у которых упругий резиновый виброизоляционный элемент не привулканизирован ни к одной из металлических деталей.

3. Сборно-сварные амортизаторы, у которых упругий резиновый элемент привулканизирован к металлическим деталям и полученный таким образом резиноталлический блок после сборки с другими металлическими деталями образует резиноталлический амортизатор.

Важнейшими функциональными расчетными характеристиками амортизаторов являются его жесткость и способность гасить амплитуду колебаний за счет внутреннего трения эластомера. Очевидно, что чем меньше жесткость амортизатора, тем больше его деформация и меньше частота собственных колебаний системы.

Жесткость, а следовательно, и деформация цилиндрической либо призматической эластомерной детали, подвергаемой сжатию, зависят от условия контактирования на торце эластомерного массива с металлическими пластинами. При незакрепленных, смазанных глицерином торцах, эластомерный массив будет деформироваться в соответствии со схемой, представленной на рис. 2, а. При деформации этого же массива с закрепленными торцами (случай сварного амортизатора), изменение формы эластомерного массива, представлено на рис. 2, б.

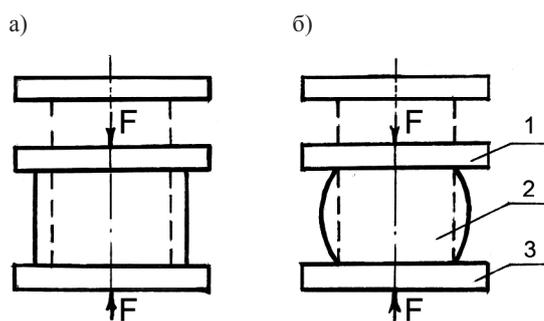


Рис. 2. Схема деформации цилиндрических образцов при сжатии:
 а — свободное скольжение; б — закрепленные торцы
 Условные обозначения: 1, 2 — опорные пластины;
 3 — эластомерный массив

Модуль упругости эластомера при сжатии $E_{сж}$, в соответствии с ГОСТом 9550–81, определяют на образцах диаметром 32 мм и высотой 38 мм со смазанными глицерином торцами и скоростью сжатия не более 0,4 мм/с. При одной и той же площади торцевых поверхностей и одинаковых условиях контактирования эластомерного массива с металлическими пластинами жесткость амортизатора зависит от легкости деформирования боковой поверхности.

Возможность деформации зависит от отношения

$$\Phi = \frac{S_T}{S_6}, \quad (2)$$

где S_T — площадь одной торцевой опорной поверхности; S_6 — площадь всей свободной боковой поверхности.

Можно утверждать, что деформация виброизоляционного массива амортизатора зависит от его формы, размеров и условий взаимодействия эластомера с опорными плитами.

Для изучения вопросов деформативности упругого массива амортизатора было спроектировано и изготовлено специальное нагружающее устройство, конструкция которого представлена на рис. 3.

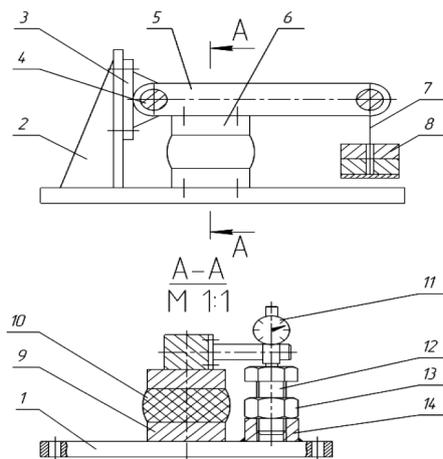


Рис. 3. Специальное нагружающее устройство:

1 — плита; 2 — упор; 3 — кронштейн; 4 — ось; 5 — рычаг; 6 — верхняя пластина; 7 — подвес;
8 — груз; 9 — нижняя пластина; 10 — эластомерный массив; 11 — стрелочный индикатор;
12 — упорный винт; 13 — контргайка; 14 — бобышка

Для экспериментального исследования деформативности виброизоляционного массива амортизатора использовались образцы прямоугольной и цилиндрической формы с различным соотношением габаритных размеров твердостью 45 ShA.

Методика по определению деформативности виброизоляционного эластомерного массива состоит из последовательного выполнения следующих действий:

1. Изготавливаем образцы различной формы и размеров для испытаний, включая образцы для определения модуля упругости при сжатии согласно ГОСТ 9550–81.

2. Установив грузы на подвес, определяем величину сжатия образца с помощью стрелочного индикатора. Нагружение производим с интервалом 0,05ε в предполагаемом рабочем диапазоне от 0 до 0,25ε.

3. С целью получения достоверных результатов измерение деформации выполняем на трех образцах выбранной геометрической формы.

4. При обработке экспериментальных данных методами математической статистики значения деформации, отличающиеся от средних значений более чем на 10 %, в расчет не принимаем.

Очевидно, что деформация виброизоляционного массива амортизатора зависит от модуля упругости эластомера при сжатии, вида контактирования полиуретанового массива с металлическими пластинами и геометрических размеров непосредственно самого упругого элемента.

Результаты (Results)

Замеры деформации упругого массива проводили для трех различных видов контактирования массива с металлическими пластинами:

– в первом случае опытный образец сжимается между смазанными пластинами и определяется модуль упругости полиуретана при сжатии согласно ГОСТ 9550–81;

– второй случай контактирования соответствует конструкции сборного амортизатора, когда виброизоляционный массив сжимается металлическими пластинами шероховатостью $R_a = 1,25$ мкм;

– в третьем случае виброизоляционный массив полимеризуется с пластинами в литевой форме и этот вид контактирования соответствует случаю сварного амортизатора.

На рис. 4 представлена зависимость деформаций образца твердостью 45ShA для трех видов контактирования на торце.

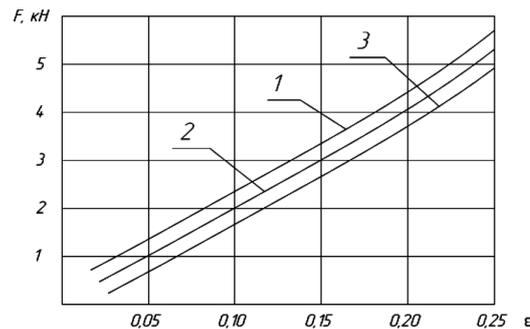


Рис. 4. Деформация полиуретановых образцов твердостью 45 ShA для трех различных видов контактирования на торцах:

- 1 — со смазанными торцами; 2 — металлические пластины шероховатостью $R_a = 1,25$ мкм; 3 — торцы неподвижны относительно металлических пластин в результате полимеризации

Благодаря точному замеру деформации экспериментального образца с помощью стрелочного индикатора ценой деления 0,01 мм, удалось выявить следующее:

1. При контакте полиуретанового образца со смазанными пластинами торцевой эффект не наблюдается и $K_{\text{тор}} = 1$.

2. При контакте полиуретанового образца с незакрепленными металлическими пластинами шероховатостью $R_a = 1,25$ мкм наблюдается увеличение жесткости образца и $K_{\text{тор } R_a=1,25} = 1,10$.

3. Для случая сварного амортизатора, когда упругий полиуретановый массив прикреплен к металлическим пластинам с помощью полимеризации, жесткость образца наибольшая и $K_{\text{тор, полим}} = 1,15$.

Значительно большее влияние на жесткость полиуретанового массива амортизатора при сжатии оказывает коэффициент формы. Имеется большое количество публикаций [6]–[8], которые свидетельствуют об увеличении жесткости образца с уменьшением его высоты.

Для образцов прямоугольной формы, аналогичных судовым амортизаторам БРМ (блоки резинометаллические) фактор формы,

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (3)$$

где a и b — размеры сторон массива, мм; H — высота массива, мм.

На основании большого количества замеров деформативности образцов прямоугольной формы, была получена зависимость коэффициента ужесточения от коэффициента формы Φ :

$$K_{\text{ужест. прям}} = 1 + 0,16\Phi^{1,04}. \quad (4)$$

Для амортизаторов, у которых виброизоляционный массив имеет форму цилиндра, фактор формы,

$$\Phi = \frac{D}{4H}, \quad (5)$$

где D — диаметр цилиндра, мм; H — высота цилиндра, мм.

После аппроксимации экспериментальных кривых «нагрузка – деформация», было получено выражение для коэффициента ужесточения цилиндрических образцов:

$$K_{\text{ужест. цил}} = 1 + 0,23\Phi^{1,13}. \quad (6)$$

Учитывая ранее изложенное, можно получить выражение для определения модуля упругости амортизатора, в котором будут учтены следующие параметры:

- модуль упругости эластомера при сжатии согласно ГОСТу 9550–81;
- характер контактирования на торцах виброизоляционного массива и металлических пластин;
- геометрическая форма упругого массива и его размеры.

Таким образом, определение модуля упругости эластомера при сжатии в изделии (в частности, в амортизаторе) можно выполнить по следующей формуле:

$$E_{\text{амор}} = E_{\text{ст}} K_{\text{тор}} K_{\text{ужест}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{ст}}$ — модуль упругости эластомера при сжатии, МПа; $K_{\text{тор}}$ — коэффициент, учитывающий характер взаимодействия на торцах между виброизоляционным массивом и опорными пластинами; $K_{\text{ужест}}$ — коэффициент, учитывающий геометрическую форму и размеры виброизоляционного массива.

Анализируя полученные для полиуретановых эластомеров зависимости «нагрузка – деформация», можно отметить, что в пределах 20 % относительной деформации зависимость мало отличается от линейной.

Осадку амортизатора в пределах 20 % деформации можно рассчитать по формуле

$$\delta = \frac{FH}{SE_{\text{изд}}}, \quad (8)$$

где F — нагрузка на амортизатор, Н; H — высота виброизоляционного массива амортизатора, мм; S — площадь поперечного сечения виброизоляционного массива, мм²; $E_{\text{амор}}$ — модуль упругости эластомера при сжатии в конструкции амортизатора, МПа.

Обсуждение (Discussion)

Полученные в ходе экспериментального исследования зависимости деформативности ячеистых полиуретановых эластомеров, довольно значительно (15–20 %) отличаются от результатов подобных исследований для сплошных полиуретановых эластомеров той же твердости [9], [10]. Вполне очевидно, что данное различие можно объяснить строением материала.

Полученные зависимости качественно совпадают с зависимостями для деформации перфорированной резины приведенными в работах [11]. Учитывая схожесть структуры эластомеров, качественный характер зависимости «нагрузка – деформация» вполне очевиден.

Заключение (Conclusion)

1. Полученные в работе эмпирические зависимости необходимо использовать при расчете осадки амортизатора для точной установки оборудования, так как требования к центровке современных силовых агрегатов постоянно повышаются и на сегодняшний день составляют $\pm 0,05$ мм.

2. Приведенные в работе эмпирические зависимости по определению деформации сжатия полиуретанового амортизатора справедливы в пределах 20 % деформации.

3. Не рекомендуется превышение данной деформации, так как макромолекулы полиуретанового эластомера переходят в ориентированное состояние, при котором снижается диссипативная возможность виброизоляционного массива амортизатора. Кроме того, при превышении данной величины относительной деформации упругого массива начинает расти собственная частота колебаний системы, что приводит к уменьшению эффективности работы амортизатора.

4. В качестве основных направлений дальнейшего изучения конструкционных свойств полиуретановых эластомеров следует предложить исследование ползучести, циклической прочности, модуля внутреннего трения и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solota S. Harteproofung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren / S. Solota // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2016. — No. 7. — Pp. 26–31.
2. Yakovlev S.N. Vibroisoating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction / S. N. Yakovlev, V.L. Mazurin // Magazine of Civil Engineering. — 2017. — No. 6 (74). — Pp. 53–60.
3. Kahraman H. Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt / H. Kahraman, E. Haberstroh // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2014. — No. 5. — Pp. 296–298.
4. Yakovlev S.N. Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing / S.N. Yakovlev // Russian Engineering Research. — 2014. — Vol. 34. — Is. 5. — Pp. 295–298. DOI: 10.3103/S1068798X14050189.
5. Yakovlev S.N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes / S.N. Yakovlev // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36. — Is. 4. — Pp. 255–257. DOI: 10.3103/S1068798X16040213.
6. Franssen O. Die Erfolgsgeschichte der Siliconelastomere. Siliconelastomere / O. Franssen, H. Bayerl // Gummi. Fasern. Kunststoffe. — 2012. — No. 7. — Pp. 462–470.
7. Zhang H. Synthesis and characterization of polyurethane elastomers / H. Zhang, Y. Chen, Y. Zhang, X. Sun, H. Ye, W. Li // Journal of Elastomers & Plastics. — 2008. — Vol. 40. — Is. 2. — Pp. 161–177. DOI: 10.1177/0095244307085540.
8. Pacheco M. F. M. Thermal, chemical, and morphological characterization of microcellular polyurethane elastomers / M. F. M. Pacheco et al // Journal of Elastomers & Plastics. — 2009. — Vol. 41. — Is. 4. — Pp. 323–338. DOI: 10.1177/0095244309095016.
9. Oßwald K. Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe / K. Oßwald, K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, W. Grellmann // KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe. — 2017. — Vol. 70. — Is. 8. — Pp. 498–506.
10. Mizera K. Thermal properties of polyurethane elastomers from soybean oil-based polyol with a different isocyanate index / K. Mizera, J. Ryszkowska // Journal of Elastomers & Plastics. — 2019. — Vol. 51. — Is. 2. — Pp. 157–174. DOI: 10.1177/0095244318772323.
11. Bakhtiyarov S.I. Rheological studies of functional polyurethane composite: Part 1. Rheology of polyurethane composite, its compounds with and without solid additives (aluminum flakes) / S.I. Bakhtiyarov, J. C. Oxley, J. L. Smith, P. M. Baldovi // Journal of Elastomers & Plastics. — 2018. — Vol. 50. — Is. 3. — Pp. 222–240. DOI: 10.1177/0095244317715787.

REFERENCES

1. Solota, Sante “Harteproofung an Hochleistungsprodukten aus Kunststoffen und Elastomeren.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 7 (2016): 26–31.
2. Yakovlev, Stanislav Nikolaevich, and Valeriy Leonidovich Mazurin. “Vibroisoating properties of polyurethane elastomeric materials, used in construction.” *Magazine of Civil Engineering* 6(74) (2017): 53–60.
3. Kahraman, Hart, and Ebel Haberstroh. “Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 5 (2014): 296–298.
4. Yakovlev, Stanislav Nikolaevich. “Self-Oscillation of an Elastic Polyurethane Coating in Polishing.” *Russian Engineering Research* 34.5 (2014): 295–298. DOI: 10.3103/S1068798X14050189.
5. Yakovlev, Stanislav Nikolaevich. “Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes.” *Russian Engineering Research* 36.4 (2016): 255–257. DOI: 10.3103/S1068798X16040213.
6. Franssen, O., and H. Bayerl. “Die Erfolgsgeschichte der Siliconelastomere. Siliconelastomere.” *Gummi. Fasern. Kunststoffe* 7 (2012): 462–470.
7. Zhang, Huibo, Yadong Chen, Yongchun Zhang, Yongchun Zhang, and Wen Li. “Synthesis and characterization of polyurethane elastomers.” *Journal of Elastomers & Plastics* 40.2 (2008): 161–177. DOI: 10.1177/0095244307085540.
8. Pacheco, Marcos F.M., Otávio Bianchi, Rudinei Fiorio, Ademir J. Zattera, Mara Zeni, Marcelo Giovanela, and Janaina S. Crespo. “Thermal, chemical, and morphological characterization of microcellular polyurethane elastomers.” *Journal of Elastomers & Plastics* 41.4 (2009): 323–338. DOI: 10.1177/0095244309095016.
9. Oßwald, K., K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, and W. Grellmann. “Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe.” *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe* 70.8 (2017): 498–506.

10. Mizera, Kamila, and Joanna Ryszkowska. "Thermal properties of polyurethane elastomers from soybean oil-based polyol with a different isocyanate index." *Journal of Elastomers & Plastics* 51.2 (2019): 157–174. DOI: 10.1177/0095244318772323.

11. Bakhtiyarov, Sayavur I., Jimmie C. Oxley, James L. Smith, and Philipp M. Baldovi. "Rheological studies of functional polyurethane composite: Part 1. Rheology of polyurethane composite, its compounds with and without solid additives (aluminum flakes)." *Journal of Elastomers & Plastics* 50.3 (2018): 222–240. DOI: 10.1177/0095244317715787.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черныш Александр Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГОАУ «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Лоцманская ул., 3
e-mail: a.chernysh1954@mail.ru

Яковлев Станислав Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГОАУ «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 29
e-mail: stannik59@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernysh, Aleksandr A. —
PhD, associate professor
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lozmannskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: a.chernysh1954@mail.ru

Yakovlev, Stanislav N. —
PhD, associate professor
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(SPbPU)
29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251,
Russian Federation
e-mail: stannik59@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

Received: April 4, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-543-553

A STUDY OF SHIPBUILDING POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR STRENGTH

M. Alsaid, A. Salamekh, V.A. Mamontov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The results of study of the mechanical properties of multilayer polymer composite materials made of glass reinforcing fillers under tension are presented in the paper. The aim of the study is to determine the influence of the reinforcing fillers number and the layers order on the tensile strength of the studied material. The analysis of the previous similar researches is carried out. The results of the study of the influence of various factors on the mechanical properties of composite materials at their manufacture, such as the manufacture method, the reinforcing fillers nature, the fibers of the reinforcing fillers orientation relative to the direction of the acting load and the influence of atmospheric factors are presented. The technology of manufacturing samples from polymer composite materials with two differently structured fillers based on the requirements of the governing standards is presented in the paper, as well as the physical and mechanical properties of the reinforcing fillers are considered. The consistency of operations at hand forming of the polymer composite material is described. The scheme and layers sequence for reinforcement are selected and justified. Based on the results of the experiment the mathematical dependence of the tension failure load from the layers number, as well as the dependence of the tensile strength from the layers number at a certain Stacking Sequence are established. The results statistical processing is performed using the Minitab 18.1 software package. The study results are presented in tabular and graphical forms. During the discussion it is proposed to apply the work results to solve the problems associated with the use of polymer composite materials in shipbuilding, for example, in the manufacture of superstructures of some dry cargo ships.

Keywords: shipbuilding, polymer composite materials, fiberglass, mechanical properties, tensile test.

For citation:

Alsaid, Mazen, Ali Salamekh, and Viktor A. Mamontov. "A study of shipbuilding polymer composite material for strength." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 543–553. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-543-553.

УДК 620.172.242

ИССЛЕДОВАНИЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ

М. Алсайд, А. Саламех, В. А. Мамонтов

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Представлены результаты исследования механических свойств многослойных полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе стеклянных армирующих наполнителей, при растяжении. Целью исследования является установление влияния количества слоев армирующих наполнителей и порядка расположения слоев, на предел прочности изучаемого материала при растяжении. Проведен анализ существующих подобных исследований. Показаны результаты проведенных исследований при изучении влияния различных факторов при изготовлении композиционных материалов на их механические свойства, таких как метод изготовления, природа армирующих наполнителей, ориентация волокон армирующих наполнителей относительно направлению воздействующей нагрузки и влияние атмосферных факторов. В работе представлена технология изготовления образцов из полимерных композиционных материалов с двумя разными по структуре наполнителями, разработанная на основе требований руководящих стандартов, а также рассмотрены физические и механические свойства армирующих наполнителей. Описана последовательность выполнения операций при ручной формировке полимерного композиционного материала. Выбрана и обоснована схема и порядок расположения слоев при армировании. На основании результатов эксперимента установлена математическая зависимость разрушающей нагрузки от количества слоев, а также зависимость предела прочности при растяжении от количества слоев при определенном порядке их расположения. Выполнена статистическая обра-

ботка результатов с использованием пакета статистических программ Minitab 18.1. Полученные результаты исследования представлены в табличной форме и графическом виде. При обсуждении предлагается применить результаты проведенных работ для решения задач, связанных с использованием полимерных композиционных материалов в судостроении, например, при изготовлении надстроек некоторых сухогрузных судов.

Ключевые слова: судостроение, полимерные композиционные материалы, стеклопластик, механические свойства, испытание на растяжение.

Для цитирования:

Алсаид М. Исследование судостроительного полимерного композиционного материала на прочность / М. Алсаид, А. Саламех, В. А. Мамонтов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 543–553. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-543-553.

Введение (Introduction)

Важный поворот в отношении классификационных морских обществ к полимерным композитным материалам (ПКМ) произошел в 2002 г., когда в Правилах «Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74)» приняли новую поправку, известную как Правила 17, которая позволила использовать альтернативные материалы в судовых конструкциях в том случае, если они обеспечивают требуемый уровень пожарной безопасности [1]. С тех пор применение ПКМ быстро расширилось как в надводном, так и в подводном судостроении [2], что позволило увеличить диапазон для изучения не только их механических характеристик, но и поведения под воздействием разных видов нагрузок при различных условиях эксплуатации. Особенностью ПКМ, отличающихся от традиционных судостроительных материалов, является их структура, содержащая два и более компонента (армирующие наполнитель и связующий), взаимодействующих между собой и имеющих свою степень влияния на механические и физические характеристики ПКМ [3]. На эту тему существует большое количество литературы, изучающей влияние множества факторов на механические характеристики ПКМ.

Результаты, полученные в работах [4], [5], показали существенное влияние методов изготовления ПКМ на основе стеклянных волокон (контактное формование, напыление, вакуумное обжатие и прессование) на растяжение, срез, изгиб, сжатие и ударную вязкость. В таком же направлении исследование [6] подтверждает, что предел прочности при растяжении образцов, изготовленных с применением указанных технологий, в три раза больше, чем предел прочности образцов, изготовленных ручной формовкой.

В работе [7] А. С. Саргсян, показал, что свойства ПКМ зависят от используемых армирующих наполнителей, а природа полимерной матрицы определяет уровень механических свойств ПКМ, температурный диапазон их эксплуатации и характер изменения свойств в условиях температурного, влажностного и атмосферного воздействий. Подробное исследование роли армирующих наполнителей выполнено в работе [8], результаты которой показывают, что предел прочности при растяжении ПКМ на основе углеродных наполнителей выше на 30 % по сравнению с гибридными ПКМ на основе углеродных и стеклянных наполнителей и на 37 % по сравнению с ПКМ, армированными только стеклянными наполнителями.

Полученные в работе [9] результаты подтверждают, что ориентация волокон армирующих наполнителей является одним из факторов, оказывающих влияние на механические свойства ПКМ. В среде ПКМ с разной ориентацией волокон относительно направления воздействующей нагрузки (0°, 35°, 45°, 90°), установлено, что волокна со значениями угла ориентации 35° дают лучшие механические характеристики при растяжении и изгибе.

Изучение влияния атмосферных факторов на механические свойства ПКМ является основным объектом во многих современных работах. При этом в работе [10] показано, что повышенная температура (150 °С) практически не оказывает влияние на модуль упругости углепластика при испытаниях на одноосное растяжение и изгиб. Однако изучение влияния повышенных температур на прочностные свойства углепластиков показало, что при повышенной температуре (150 °С) среднее значение предела прочности при растяжении снижается на 15 %, а при изгибе

— на 30 % по сравнению со средними значениями, полученными при нормальной температуре. Для стеклопластика выявлено немонотонное снижение модуля упругости при пониженных и повышенных температурах: 50 °С, 40 °С, 22 °С, 0 °С, –30 °С относительно испытаний при нормальных температурах. Четкого влияния на предел прочности температур не выявлено, а для гибридных ПКМ, армированных волокнами из углерода и кевлара, предел прочности увеличивается при пониженных температурах: –10 °С, –5 °С, 0 °С [11].

Исходя из ранее изложенного, многослойные ПКМ имеют неоднородную структуру и на их прочность в большей степени оказывают влияние следующие факторы:

- количество и порядок укладки слоев армирующего элемента;
- свойства и соотношение количеств использованных армирующего элемента и связующего;
- направление волокна относительно оси воздействия нагрузок;
- атмосферные факторы (температура, давление);
- приемлемый метод изготовления.

На основании ранее изложенного следует заметить, что механические свойства ПКМ мало изучены с учетом количества слоев армирующих наполнителей, что является целью настоящего исследования. Изучение влияния количества слоев, армированных двумя разными по структуре стеклянными наполнителями, на предел прочности при растяжении ПКМ является задачей исследования, а объектом исследования служат образцы, изготовленные с разным количеством слоев.

Следует отметить, что в настоящее время проводится исследование влияния количества слоев ПКМ с одним наполнителем на основе стеклянных тканей.

Методы и материалы (Methods and Materials):

Для изучения влияния количества слоев на прочность ПКМ при растяжении были изготовлены пять партий образцов с разным количеством слоев: $n = 3; 6; 9; 12; 15$, при этом образцы вырезали из пластин, имеющих квадратную форму со стороной квадрата 600 мм согласно ГОСТу 33345–2015¹.

Материал изготовленных пластин — композитные материалы, армированные стеклянными волокнами. В состав данного материала входят следующие компоненты:

1. Стекломат марки EMC-600-1250-E — эмульсионная ткань, изготовленная компанией «Джуши» (Jushi Group).
2. Термореактивная ортофталевая полиэфирная смола «Яркопол-110», выпускаемая заводом «Ярославские полиэфир».
3. Ровинговая стеклоткань (Рогожа) марки EWR 560 — двунаправленная ткань, сотканная из переплетенных между собой нитей прямого стекловолокна. Основные характеристики выбранных компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства выбранных компонентов

EMC-600-1250-E ²		Яркопол-110 ³		EWR 560 ⁴	
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Поверхностная масса, г/м ²	600 ± 7,5	Плотность, при $t = 23$ °С, г/см ³	1,13–1,14	Поверхностная масса, г/м ²	560
Содержание связующего, %	3,5 ± 1,1	Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	70–100	Содержание влаги, %	≤ 0,15

¹ ГОСТ 33345–2015. Композиты полимерные. Производство пластин для изготовления образцов для испытаний. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.

² E-Glass Emulsion Chopped Strand Mat. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://en.jushi.com/uploads/soft/jushiEN%20Products/EGlass%20Emulsion%20Chopped%20Strand%20MatE02.pdf> (дата обращения: 11.02.2019).

³ Характеристики смолы «Яркопол-110». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://megaplast.org/images/pdf/Yarkopol_110.pdf (дата обращения: 11.02.2019).

⁴ Ровинговая стеклоткань марки EWR 560. ЕЗИМ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.e-zim.ru/products/rovingovaya-tkan/> (дата обращения: 10.02.2019).

Окончание табл. 1

Прочность на разрыв, Н	≥ 160	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	90–140	Содержание замазливателя, %	$0,6 \pm 0,2$
Удельная разрывная нагрузка по вертикали, Н/мм	60	Относительное удлинение при разрыве, %	3–5	Разрывная нагрузка по вертикали, Н	2800
Удельная разрывная нагрузка по горизонтали, Н/мм	60	Прочность при разрыве, МПа	45–65	Разрывная нагрузка по горизонтали, Н	2800

Методом изготовления пластин является ручная формовка, при которой оформление пластин начинается со смазки матрицы смолой, затем происходит укладка первого слоя ткани, который должен тесно закрепляться с матрицей. Поэтому валик пропитывают смолой с повышенным добавлением отвердителя. Через 20–25 мин происходит нанесение остальных слоев ткани в последовательности (укладка ткани → пропитка смолой → прокатывание металлическим валиком для удаления воздуха). В конце оформления листа его необходимо оставить для высыхания на 48 ч при температуре окружающей среды, затем выполнить процесс кондиционирования не менее 16 ч при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %. Для обеспечения отверждения пластин перемешивают смолы с отвердителем марки «Бутанокс М-50» (Butanox M-50). По окончании процесса кондиционирования пластины извлекаются из матрицы и подвергаются механической обработке, к которой относятся: шлифовка поверхности и обрезка облоя — излишков стеклопластика или отвержденной полиэфирной смолы по краям листов (обрезают пластину с каждой стороны не менее чем на 10 мм).

Выбранная схема армирования изготовленных пластин (рис. 1) учитывает симметричность распределения слоев, что исключает возможность возникновения межслойного сдвига в конструкции из ПКМ. Это можно заметить в рекомендуемых типах стеклопластиков для корпусных конструкций судов, рекомендуемой правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС)¹. Соотношение количества слоев стекломата к количеству слоев ровинговой стеклоткани для всех пластин равно 1/3. При этом для исключения влияния других факторов процесс изготовления пластин производится с фиксированными значениями долей добавленных смол и отвердителя (по требованию технических нормативов изготовленного материала для каждого слоя ткани добавлено 400 см³ смолы, при этом доза отвердителя составляет 4 см³).

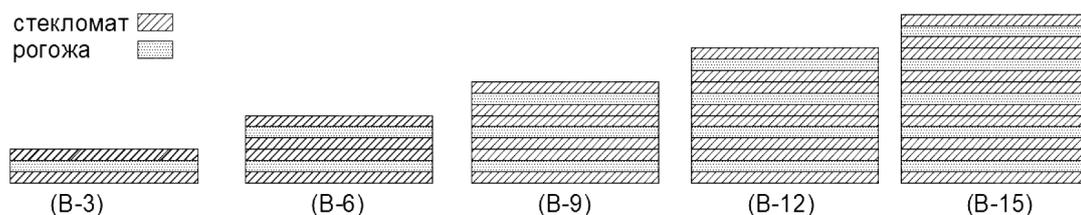


Рис. 1. Схема армирования изготовленных пластин

В качестве объекта исследования выбраны плоские образцы без головок (рис. 2) в соответствии с ГОСТом 11262–2017. Основные размеры образцов приведены в табл. 2.

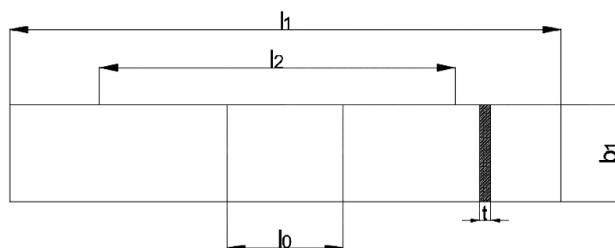


Рис. 2. Форма образцов для испытания

¹ Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVI. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. 32 с.

Конструктивные элементы образцов

Параметр	Значение, мм
Общая длина l_1 , не менее	250
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце l_2	1705
Расчетная длина l_0	501
Ширина головки b_1	251

Согласно ГОСТу 33345-2015, процесс обрезки образцов из пластинок выполняется при помощи ленточной пилы со скоростью резки не менее 915 м/мин; число зубьев на метр ленты — 400–550. Шероховатость поверхности образцов должна быть не более $Ra = 6,3$ мкм. На рис. 3 показаны образцы, изготовленные для испытания. Для определения предела прочности при растяжении изготовленные образцы были испытаны на гидравлической универсальной машине «АМСЛЕР» типа 50 SZBDA 223.

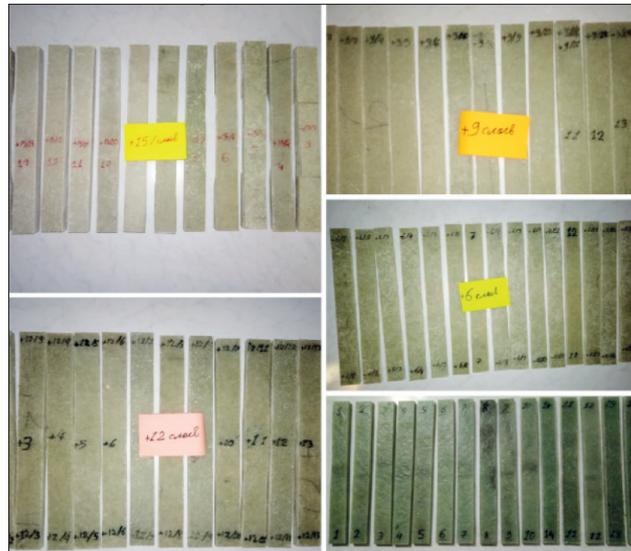


Рис. 3. Изготовленные образцы

Методика испытания образцов подробно описана в ГОСТе 11262–2017¹. Нагружения осуществляются вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой при фиксированной скорости перемещения захватов машины ($V = 5$ мм/мин). В результате испытаний определены значения силы F_{max} , при которой происходит разрыв (или разрушение) образцов. Предел прочности при растяжении определяется по формуле

$$\sigma_B = \frac{F_{max}}{A}, \quad (1)$$

где F_{max} — разрушающая нагрузка, Н; $A = b \cdot h$ — площадь поперечного сечения образца, мм² (рассчитывается после определения средних значений толщины h и ширины b образца, измеряемых в трех плоскостях (в середине и по краям)).

Для каждой партии проведена серия экспериментов до получения удовлетворительных результатов исследуемых образцов. В расчете использовались результаты испытания образцов, разрушенных в рабочей части. Образцы, разрушенные вне рабочей части (в захватах машины), не учитываются, и исключаются из дальнейшего расчета (рис. 4).

¹ ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.

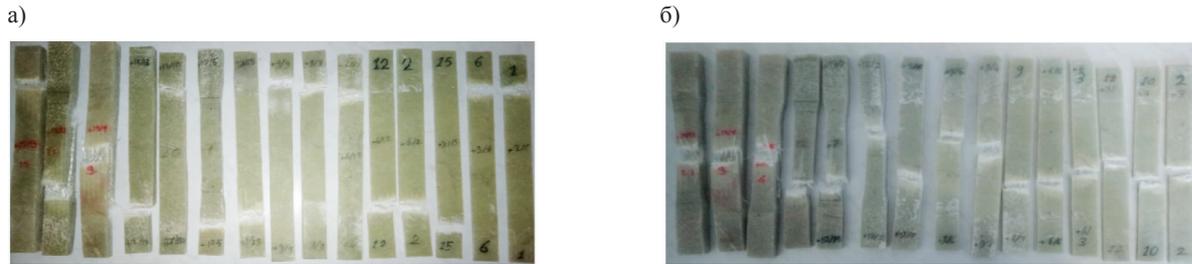


Рис. 4. Образцы после испытаний:
а — исключенные из расчета; б — принятые для расчета

Статическая обработка полученных результатов выполнялась на основе стандартных методов, приведенных в работах [12], [13] с использованием пакета статистических программ Minitab 18.1 (пробная тридцатидневная версия). Эти программы выполняют необходимые расчеты статистической обработки данных на основе выбранного исследователем уровня значимости P . При этом любая нулевая статистическая гипотеза отклоняется, если полученный уровень значимости при расчете меньше уровня значимости, определенного исследователем. В данной работе выбранный уровень значимости составил $P = 0,05$.

Результаты (Results)

Для определения предела прочности ПКМ на основе стеклянных тканей EMC-600-1250-E, EWR 560 и смолы «Яркопол-110» на растяжение в ходе эксперимента были испытаны по пятнадцать образцов для каждой партий (В-3, В-6, В-9, В-12, В-15), результаты которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

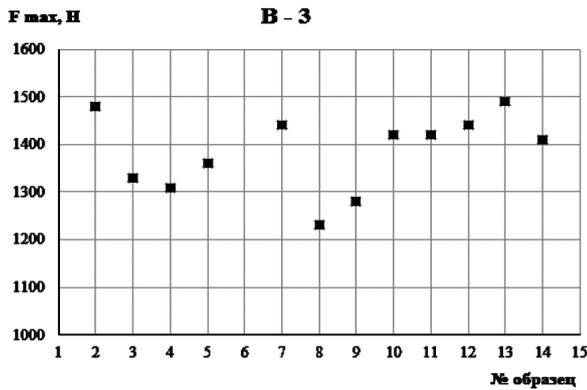
Результаты испытаний образцов на растяжение

Номер образца	Предел прочности при растяжении				
	В-3	В-6	В-9	В-12	В-15
1	143	136	108	119	129
2	159	150	143	125	122
3	151	142	105	152	95
4	157	139	146	131	123
5	149	136	135	136	113
6	134	141	127	157	135
7	159	150	150	124	128
8	140	140	142	109	130
9	147	132	134	137	89
10	157	154	117	77	148
11	157	142	132	133	109
12	161	137	151	135	127
13	165	138	134	153	131
14	166	134	128	134	121
15	136	136	105	147	91

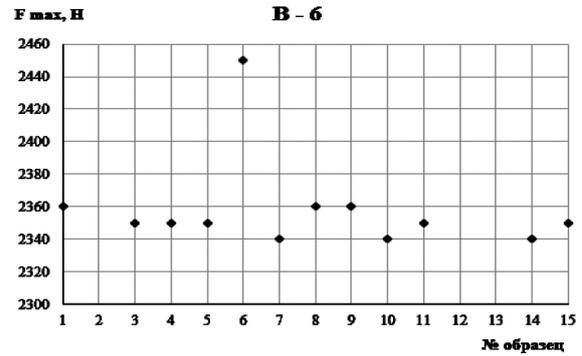
Примечание. ■ — разрушение образца произошло вне рабочей зоны, результаты в расчет не принимаются.

Распределения разрушающей нагрузки F_{\max} для испытанных партий в графическом виде показаны на рис. 5.

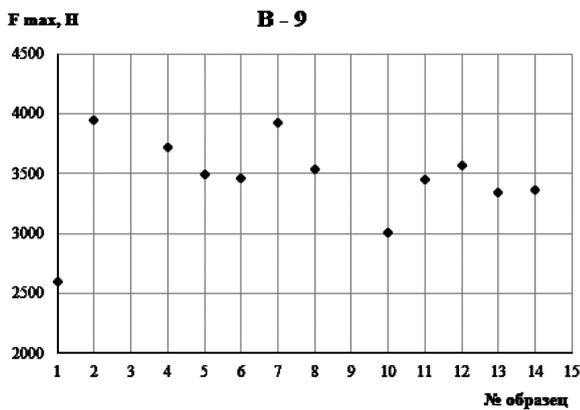
а)



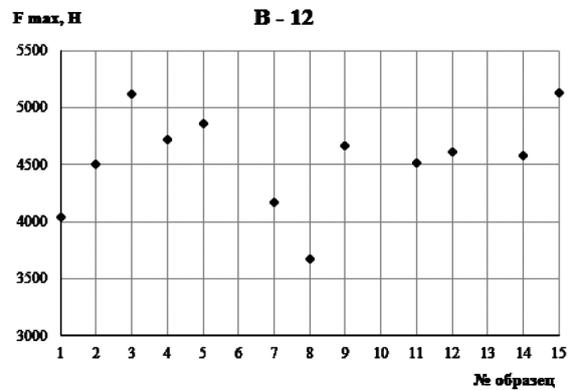
б)



в)



г)



д)

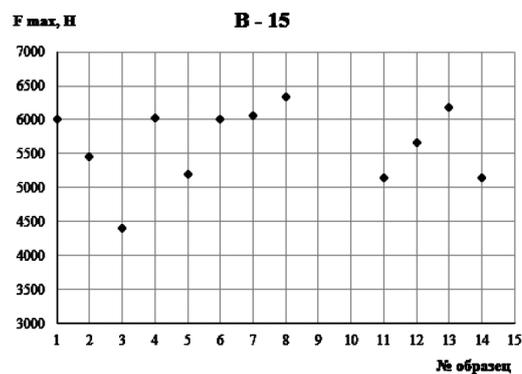


Рис. 5. Распределение разрушающей нагрузки для каждой партии:
 а — результаты для партии В-3; б — результаты для партии В-6;
 в — результаты для партии В-9;
 г — результаты для партии В-12; д — результаты для партии В-15

При испытании образцов на растяжение установлено соотношение между разрушающей нагрузкой F_{\max} и количеством слоев (рис. 6), при этом F_{\max} линейно увеличивается с увеличением количества слоев:

$$F_{\max} = 356,51 \cdot N + 266,91. \quad (2)$$

Используя метод дисперсионного анализа (ANOVA), результаты которого приведены в табл. 4, была выполнена проверка значимости влияния количества слоев на предел прочности

ПКМ на основе выбранных компонентов. Полученный уровень значимости дисперсионного анализа меньше, чем предлагаемый уровень $P - value = 0,05$, откуда следует, что средние значения между партиями отличаются друг от друга, и, следовательно, можно сделать вывод о значимости влияния количества слоев на предел прочности при растяжении.

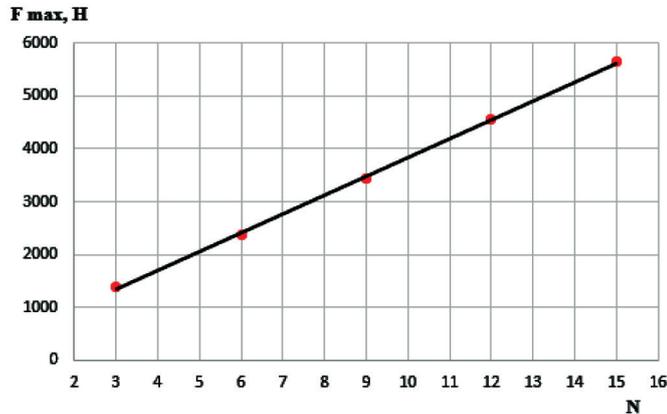


Рис. 6. Зависимость разрушающей нагрузки от количества слоев

Таблица 4

Проверка значимости влияния количества слоев на предел прочности при растяжении

Метод					
Нулевая гипотеза — все средние однородны. Альтернативная гипотеза — существует хотя бы одно отличающееся среднее. Предлагаемый уровень значимости равен 0,05.					
Информация о факторе					
Фактор	Уровень		Значение		
Фактор	5		В-3;В-6;В-9;В-12;В-15		
Дисперсионный анализ					
Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Фактор	4	7393	1848,3	17,50	0,000
Ошибка	55	5810	105,6	—	—
Всего	59	13203	—	—	—

Примечания: DF — статистическое число степеней свободы; SS — сумма среднеквадратичных отклонений (СКО); MS — математическое ожидание СКО; Adj SS — скорректированная сумма СКО; Adj MS — скорректированное математическое ожидание СКО; F-Value — статистика критерия Фишера; P-Value — уровень значимости.

Для установления математических соотношений, описывающих влияние изменчивости количества слоев на предел прочности ПКМ на основе стекляных тканей EMC-600-1250-E, EWR 560 и смолы «Яркопол-110», используется регрессионный анализ, выполненный программой Minitab 18.1, по результату которого математическая зависимость между количеством слоев (N) и пределом прочности при растяжении σ_b имеет следующий вид:

$$\sigma_b = 159,53 - 2,522 \cdot N. \quad (3)$$

На рис. 7 показан график зависимости между количеством слоев и пределом прочности при растяжении, и также вычислен 95 % доверительный интервал для линии регрессии в целях установления теоретической значимости между изучаемыми величинами σ_b .

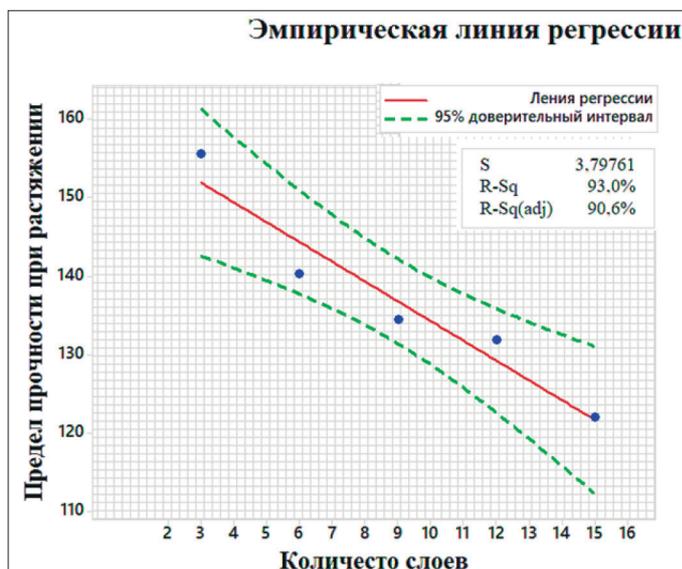


Рис. 7. Зависимость предела прочности при растяжении от количества слоев

Обсуждение (Discussion)

Результаты испытаний образцов на растяжение подтверждают значимость влияния количества слоев, армированных наполнителями на разрушающую нагрузку, а также на предел прочности изучаемого материала. Выявлена линейность обеих математических зависимостей разрушающей нагрузки и предела прочности от количества слоев. Несмотря на то, что разрушающая нагрузка пропорциональна количеству слоев, установлено уменьшение предела прочности при растяжении с увеличением количества слоев. Данные результаты объясняется двумя факторами: во-первых, увеличением площади сечения образцов за счет увеличения количества слоев; во-вторых, хрупкостью связующей, так как с увеличением количества слоев одновременно увеличивается доля участия связующего в принятии нагрузки.

Результаты проведенного исследования показали необходимость более рационального выбора соотношения компонентов на этапе проектирования конструкций из ПКМ.

Заключение (Conclusion)

В данной работе для исследования влияния количества слоев на механические свойства ПКМ были проведены экспериментальные исследования, полученные на основе испытаний пяти партий образцов с разным количеством слоев на растяжение. Результаты подтверждают значимость влияния количества слоев на предел прочности ПКМ на основе стеклянных тканей при растяжении, при этом установлено линейное соотношение между ними. Также выясняется линейность зависимости между разрушающей нагрузкой и количеством слоев. Результаты исследования показывают, что разрушающая нагрузка пропорциональна количеству слоев, а предел прочности при растяжении снижается с увеличением количества слоев. Полученные результаты можно использовать для рационального проектирования судовых конструкций из ПКМ на основе стеклянных тканей, а именно при выборе количества слоев, необходимых для восприятия воздействующих нагрузок. Для возможного практического применения ПКМ в судостроении необходимо, по-нашему мнению, изучение следующих дополнительных факторов:

- исследование механических свойств при других видах нагрузок на сжатие и изгиб;
- использование других типов смол, в частности, эпоксидной смолы в качестве полимерной матрицы;
- установление влияния количества слоев ровинговой стеклоткани EWR 560, внедренных в структуру материала, на предел прочности при растяжении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tawfik B. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials / B. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, T. Elsayed // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2017. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 185–198. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.09.005.
2. Никитин В. С. Современное состояние и перспективы применения композитов в зарубежном подводном кораблестроении / В. С. Никитин, В. Н. Половинкин // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2017. — № 4 (328). — С. 57–74.
3. Васильев В. В. Композиционные материалы / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1990. — 512с.
4. Карпов Я. С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я. С. Карпов, О. В. Ивановская. — Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т, 2001. — 153с.
5. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — М.: Машиностроение, 1990. — 527 с.
6. Мальцев И. М. Технология формирования корпуса судна из листового композиционного материала / И. М. Мальцев, А. Р. Рубан // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 1-1 (39). — С. 71–76.
7. Саргсян А. С. Высокопрочные стеклопластики на основе теплостойких и термостойких полимерных связующих для изделий судовой электротехники: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Артем Самвелович Саргсян. — СПб.: ФГУП ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», 2016. — 143 с.
8. Belgacema L. Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy) / L. Belgacema, D. Ouinas, J. A.V. Olay, A. A. Amado // *Composites Part B: Engineering*. — 2018. — Vol. 145. — Pp. 189–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.03.026.
9. Rahmani H. Mechanical Properties of Carbon Fiber / Epoxy Composites: Effects of Number of Plies, Fiber Contents, and Angle-Ply Layers / H. Rahmani, S. H. M. Najafi, S. Saffarzadeh-Matin, A. Ashori // *Polymer Engineering & Science*. — 2014. — Vol. 54. — Is. 11. — Pp. 2676–2682. DOI: 10.1002/pen.23820.
10. Лобанов Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / Дмитрий Сергеевич Лобанов. — Пермь: ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 2015. — 148 с.
11. Hashim N. Tensile Properties of Woven Intra-Ply Carbon/Kevlar Reinforced Epoxy Hybrid Composite at Sub-Ambient Temperature / N. Hashim, D. L. A.Majid, D. M. Baitab, N. Yidris, R. Zahari // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. — 2019. — Vol. 15. — Pp. 1–8. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11567-X
12. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник / М. Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
13. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н. Ш. Кремер. — М.: Миметика, 2016. — 514 с.

REFERENCES

1. Tawfik, B., H. Leheta, A. Elhewy, and T. Elsayed. “Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9.2 (2017): 185–198. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.09.005.
2. Nikitin, V., and V. Polovinkin. “State of the art and prospects of composites in foreign submarine shipbuilding.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 4 (2017): 57–74.
3. Vasilyev, V. V., V. D. Protasov, and V.V. Bolotin. *Kompozitsionnye materialy*. M.: Mashinostroenie, 1990.
4. Karpov, Ya. S, and O. V. Ivanovskaya. *Kompozitsionnye materialy: komponenty, struktura, pererabotka v izdeliya*. Khar’kov: Natsional’nyi aehrokosmicheskii un-t, 2001.
5. Lakhtin, Yu. M., and V. P. Leont’eva. *Materialovedenie*. M.: Mashinostroenie, 1990.
6. Maltsev, Maksim I., and Anatoliy R. Ruban. “Technology of the hull formation from sheet composite material.” *Marine Intelligent Technologies* 1-1(39) (2018): 71–76.
7. Sargsyan, A. S. Vysokoprochnye stekloplastiki na osnove teplostoikikh i termostoikikh polimernykh svyazuyushchikh dlya izdelii sudovoi ehlektrotekhniki. PhD diss. SPb.: FGUP “CNII konstruktsionnykh materialov “Prometej”, 2016.

8. Belgacema, L., D. Ouinas, J.A.V. Olay, and A.A. Amado. “Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy).” *Composites Part B: Engineering* 145 (2018): 189–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.03.026.

9. Rahmani, Hossein, S. Heydar Mahmoudi Najafi, Shohreh Saffarzadeh-Matin, and Alireza Ashori. “Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply layers.” *Polymer Engineering & Science* 54.11 (2014): 2676–2682. DOI: 10.1002/pen.23820.

10. Lobanov, D. S. Eksperimental’nye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov i panelei s zapolnitelem. PhD diss. Perm’: FGBOU VPO “Permskii natsional’nyi issledovatel’skii politekhnicheskii universitet”, 2015.

11. Hashim, N., D. L. A. Majid, D. M. Baitab, N. Yidris, and R. Zahari. “Tensile Properties of Woven Intra-Ply Carbon/Kevlar Reinforced Epoxy Hybrid Composite at Sub-Ambient Temperature.” *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* 15 (2019): 1–8. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11567-X.

12. Stepnov, M. N. *Statisticheskie metody obrabotki rezul’tatov mekhanicheskikh ispytaniĭ: Spravochnik*. M.: MashinostroeniE, 1985.

13. Kremer, N. Sh. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika*. M.: Mimetika, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алсаид Мазен — аспирант
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: mazenal60@yahoo.com

Саламех Али —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: a.salameh@mail.ru

Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: a.salameh@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alsaid, Mazen — Postgraduate
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: mazenal60@yahoo.com

Salamekh, Ali —
PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: a.salameh@mail.ru

Mamontov, Viktor A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian
Federation
e-mail: a.salameh@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

Received: April 25, 2019.

FORCES ON THE MANOEUVRING SHIP PROPELLER

M. P. Lebedeva¹, L. I. Vishnevskii^{2,3}

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

² — St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

³ — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The longitudinal and lateral components of hydrodynamic force on propeller of manoeuvring ship are considered in the paper. Data of the Shipbuilding manual (Sudostroenye, Leningrad, 1973) are used to define the longitudinal force. The propeller thrust is shown as an universal coefficient versus universal propeller advance. That allows us to analyze the longitudinal force for all possible values of model speed and propeller frequency. The lateral component of hydrodynamic force is measured in circular towing tank. The propeller force is measured on the model shaft using the miniature dynamometer placing in deadwood pipe. While side force measuring, in addition to changing the model velocity and propeller rotation frequency, the drift angle is changed. Both components of hydrodynamic force on the propeller are shown as a diagram versus universal propeller advance. To calculate the universal propeller advance for longitudinal component of force the velocity projection on X-axis is used, and to calculate the universal propeller advance for lateral component of force the velocity projection on Y-axis is used. The universal coefficients represented in that way do not depend on the propeller work conditions, i.e. the independent parameters number is reduced. The universal lateral component of force turns up multiple-value. The universal advance maximum and minimum values divide the curves into parts at points corresponding to 90° and 270° drift angles.

Keywords: longitudinal force, thrust, lateral force, propeller, manoeuvring, ship, universal advance, universal coefficient, drift angle.

For citation:

Lebedeva, Marina P., and Leonid I. Vishnevskii. "Forces on the manoeuvring ship propeller." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 554–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-56.

УДК 629.12

СИЛЫ НА ГРЕБНОМ ВИНТЕ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СУДНА

М. П. Лебедева¹, Л. И. Вишневский^{2,3}

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

² — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты анализа продольной и боковой составляющих сил, возникающих на гребном винте маневрирующего судна. Для определения продольной составляющей силы или упора гребного винта использовались ранее полученные данные, опубликованные в открытой печати. Упор гребного винта определялся в виде универсальных коэффициентов в зависимости от универсальной поступи, что давало возможность рассматривать значения силы во всем возможном диапазоне скоростей хода и частоты вращения гребного винта. Боковая сила на гребном винте определялась по результатам испытаний в опытном бассейне. Измерения боковой силы проводились непосредственно на гребном валу модели с помощью миниатюрного динамометра, вмонтированного в дейдвуд. Боковая сила, измеренная на гребном винте, также была представлена в виде универсальных коэффициентов. Во время измерений боковой силы на винте, кроме скорости буксировки модели и частоты вращения гребного винта, варьировался угол дрейфа модели. Обе составляющие силы на гребном винте представлялись графически в зависимости от универ-

сальной поступи. При расчете универсальной поступи для продольной составляющей силы использовалось значение проекции скорости при центре тяжести модели на диаметрально плоскость, а при расчете универсальной поступи для построения боковой составляющей силы использовалось значение проекции скорости при центре тяжести модели на плоскость шпангоута. Представленные в таком виде значения универсальных коэффициентов практически не зависели от режима работы гребного винта, т. е. сократилось число независимых параметров. Универсальная боковая сила на винте, построенная от универсальной поступи, оказалась неоднозначной. Значения функции при максимальной поступи делят кривую на части в точках, соответствующих углам дрейфа 90° и 270° .

Ключевые слова: продольная сила, упор, поперечная сила, винт, маневрирование, судно, универсальная поступь, универсальный коэффициент, угол дрейфа.

Для цитирования:

Лебедева М. П. Силы на гребном винте маневрирующего судна / М. П. Лебедева, Л. И. Вишневецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 554–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-56.

Введение (Introduction)

В последнее время с развитием вычислительной техники появилась возможность решения более сложных задач, чем рассматриваемые во второй половине XX в. К числу задач, не рассмотренных до настоящего времени, относятся задачи маневрирования судна в стесненной акватории [1]–[3], описания маневров аварийной остановки судна [4], описания швартовных операций и др. Решение этих задач невозможно без учета всех действующих на движущемся произвольно судне сил, включая обе составляющие силы на гребном винте.

Гидродинамические силы на гребном винте всегда были и остаются предметом особого внимания исследователей, поскольку правильная их оценка позволяет правильно предсказать ходовые качества судна, расход топлива и др. Известны работы ведущих специалистов в теории гребных винтов, к которым относятся: А. М. Басин, И. Я. Миниович, А. Ф. Пустошный, В. М. Штумпф, А. А. Русецкий, В. Ф. Бавин, Н. Ю. Завадовский, Ю. Л. Левковский, В. Г. Мишкевич [5]–[9]. Прежде всего, теория гребного винта исследует силу, действующую на судно в продольном направлении, т. е. упор гребного винта, прямо связанный со скоростью движения судна.

Вопрос о существовании боковой силы на гребном винте был исследован в работах И. Я. Миниовича еще в 1946 г. [10]. Спустя 20 лет он был рассмотрен М. А. Гречиным [11]. Упоминается об этом и в работе А. Д. Гофмана [9]. Больше к этому вопросу не возвращались, поскольку было установлено, что боковая сила на винте при выполнении стандартных маневров для движущегося передним ходом судна значительно меньше его упора. Несмотря на то, что с момента первой постановки задачи о силах на гребном винте прошло более 70 лет, состояние вопроса существенно не изменилось. Значительная часть работ посвящена исследованию упора гребного винта при движении прямым курсом [12], а также расчету влияния боковой силы на параметры маневра «Зигзаг» [13]. Стало традиционным заменять физический эксперимент численным моделированием. В частности, расчетным способом были определены значения боковой силы на гребном винте при движении судна передним и задним ходом [14], а также выполнено расчетное исследование влияния угла дрейфа на силы взаимодействие руля винта и корпуса [15]–[17].

В ряду указанных задач отдельно находится исследование влияния боковой силы на гребном винте на колебания гребного вала [18]. Во всех указанных работах боковая сила рассматривается только при нулевом или малом угле дрейфа. Известны лишь результаты измерения тяги гребного винта при различных углах натекания потока и угол разворота вектора тяги, выполненные Е. Мюллером в Дуйсбургском опытовом бассейне [9], однако при развороте вектора тяги, упор гребного винта и боковая сила изменяются, и разделить их не представляется возможным. Между тем известны маневры, при расчете которых необходимо выделение отдельных компонентов силы на винте при произвольном значении углов дрейфа. Такие результаты были получены авторами в рамках исследований масштабного эффекта управляемости, завершенной в конце 80-х гг. XX в. Первая

публикация материалов вышла в трудах конференции XIV «Крыловские чтения» в 2013 г. [19]. Настоящую работу можно рассматривать как продолжение этих исследований. На данном этапе был выполнен углубленный анализ экспериментальных данных, на основании которого составлена схема пересчета боковой составляющей силы на гребном винте на натурное судно.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Модель и методика проведения эксперимента. Экспериментальное исследование боковой силы на гребном винте выполнялось в циркуляционном опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Для этих целей была выбрана схематизированная модель танкера со следующими главными размерениями:

- длина — $L = 1,98$ м;
- ширина — $B = 0,396$ м;
- осадка — $T = 0,11$;
- коэффициент общей полноты $C_b = 0,76$.

Теоретический чертеж модели приведен на рис. 1.

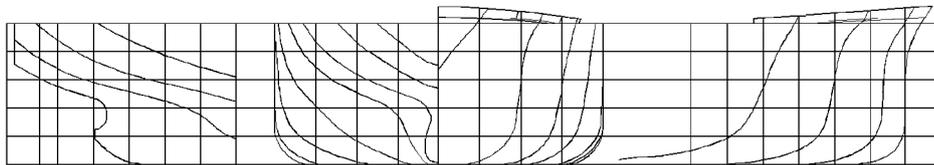


Рис. 1. Эскиз корпуса испытанной модели

Модель была оборудована одним полубалансирным рулем, установленным в диаметральной плоскости за гребным винтом правого вращения. Диаметр гребного винта был равен $D_p = 0,064$ м, относительный шаг составлял $H/D_p = 1$. Угол перекладки руля во время эксперимента не изменялся и равнялся нулю.

Условие свободного самохода модели под кабиной буксировочного устройства обеспечивалось при нулевом значении угла дрейфа. При этом выдерживались следующие параметры:

- скорость хода $V = 0,35$ м/с;
- частота вращения гребного винта $n = 8,75$ с⁻¹;
- поступь гребного винта $J_p = 0,625$.

Специально для измерения боковой силы на винте был изготовлен миниатюрный динамометр, который был встроен в дейдвудную трубу модели и измерял боковую силу непосредственно на гребном валу. Диапазон измеряемых величин составляет ± 1 Н.

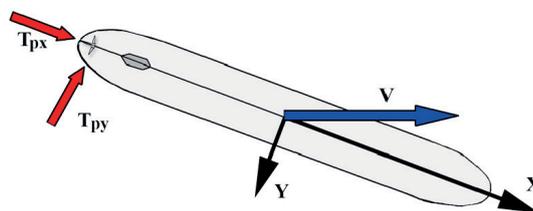


Рис. 2. Схема действия сил

Буксировка модели осуществлялась по круговой траектории радиусом 30 м, что соответствовало размеру, равному 15 длин корпуса модели. Несмотря на то, что траектория движения модели была пологой, при обработке результатов учитывались все необходимые поправки. Для парирования возможного масштабного эффекта шероховатость поверхности корпуса искусственно увеличивалась. Увеличение сопротивления учитывалось при обеспечении режима свободного самохода.

При измерениях принималась система координат, связанная с моделью. Положительными считались продольная сила, направленная в сторону носовой оконечности модели, боковая сила, направленная в сторону правого борта. Нулевое значение угла дрейфа β соответствовало переднему ходу модели. Угол дрейфа отсчитывался модели по часовой стрелке начиная от нулевого значения. В процессе испытаний величина угла дрейфа изменялась в пределах от 0° до 360° с шагом 5 град.

При измерениях боковой силы на гребном винте скорость буксировки модели превышала значения скорости при движении свободным самоходом и составляла 0,6 м/с ($Fn = 0,15$). Увеличение скорости буксировки было принято вынужденно с целью повышения точности измерений. Для сохранения значения поступи частота вращения гребного винта была увеличена до $15,0 \text{ с}^{-1}$. Частота вращения гребного винта варьировалась в пределах от $-15,0 \text{ с}^{-1} \leq n \leq +15,0 \text{ с}^{-1}$, что позволяло рассмотреть работу гребного винта во всем возможном диапазоне значений частоты вращения, характерной для этой модели. Значения частоты вращения гребного винта при испытаниях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения частоты вращения гребного винта при испытаниях

	Режим работы гребного винта	Частота вращения, с^{-1}
1	Передний ход	15,0
2	Передний ход	8,75
3	Винт застопорен	0
4	Задний ход	-8,75
5	Задний ход	-15,0

При вариации угла дрейфа скорость буксировки и частота вращения гребного винта сохранялись неизменными. Результаты измерения боковой силы на гребном винте при различных значениях β показаны на рис. 3. По оси абсцисс отложены значения углов дрейфа. По оси ординат отложены безразмерные значения боковой силы на винте, отмеченной индексом P , определяемые по формуле

$$C_{yP} = \frac{Y_P}{0,5\rho V_0^2 LT}, \quad (1)$$

где Y_P — измеренное значение боковой силы на гребном винте; V_0 — скорость буксировки модели при $\beta = 0^\circ$; L, T — соответственно длина и осадка модели.

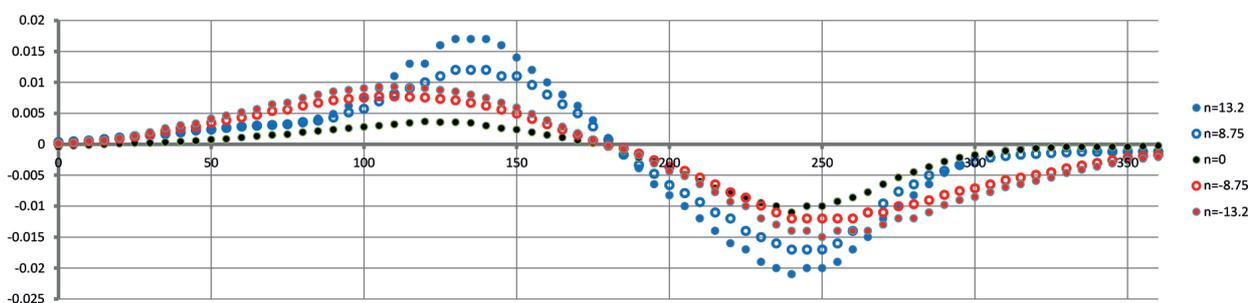


Рис. 3. Боковая составляющая нагрузки гребного винта на циркуляции

Результаты измерения показали, что изменение угла набегающего на винт потока (угла дрейфа) приводит к возникновению значительной по величине боковой силы, зависящей от величины этого угла и от частоты вращения гребного винта.

Боковая сила на гребном винте знакопеременна. Причем знак силы не зависит от направления вращения гребного винта. Максимальные значения боковой силы на гребном винте достигаются при его работе на задний ход. При этом экстремальные значения боковой силы достигаются при углах дрейфа порядка 140 и 240 град.

При работе гребного винта на передний ход боковая сила достигает максимальной величины при углах дрейфа, близких к 90 град. Значения боковой силы меньше по величине, чем соответствующие значения, наблюдаемые при работе гребного винта на задний ход. Значения боковой силы на застопоренном гребном винте (черные точки на рис. 3, $n = 0$), соответствующие работе гребного винта при бесконечной поступи, примерно вдвое меньше соответствующих значений при ходовой поступи.

Универсальные коэффициенты на гребном винте модели для случая движения с нулевым углом дрейфа. Для решения задач управляемости в общей постановке необходимы данные о значениях гидродинамических сил во всем возможном диапазоне параметров. Применительно к гребному винту необходимо знать составляющие гидродинамической силы при значениях углов дрейфа в диапазоне от 0 до 360 град и при значениях поступи гребного винта:

$$J_p = \frac{V}{n_p D_p},$$

где V — скорость перемещения судна; n_p — частота вращения гребного винта; D_p — диаметр гребного винта.

Как видно из определения поступи, она принимает бесконечно большие значения при движении с застопоренным винтом, что является основным режимом при расчете маневра торможения. Это обстоятельство является серьезной проблемой при вычислении кинематических параметров движения судна. Исключить эту особенность можно используя понятие *универсальных коэффициентов*, предложенное В. Г. Бакаевым и В. М. Лаврентьевым 1955 г. [1]. Формулы для расчета универсальных коэффициентов имеют вид:

– для расчета универсального коэффициента упора гребного винта

$$K_{px} = \frac{P}{\rho D_p^2 (V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2)}; \quad (2)$$

– для расчета универсальной поступи гребного винта

$$\Lambda_p = \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2}}, \quad (3)$$

где P — упор гребного винта, V_0 — скорость перемещения судна с нулевым углом дрейфа.

Значения универсальных кривых для испытанного гребного винта при нулевом значении угла дрейфа приведены далее. Поскольку оборудование не позволяло выполнить измерение упора гребного винта, для анализа были использованы универсальные кривые для гребного винта серии В [20] с шагом $H/D_p = 1$. Кривые воспроизведены здесь на рис. 4. По оси абсцисс отложены значения универсальной поступи. Значения K_{px} определяют продольную составляющую силы на гребном винте, т. е. упор гребного винта. Значение K_{px} рассчитывалось по формуле (2). На приведенных кривых красным цветом выделены значения упора гребного винта, работающего на передний ход, синим цветом — значения упора гребного винта, работающего на задний ход.

На рис. 4 можно выделить четыре режима работы гребного винта: режимы 1 и 2 определяют движение модели передним и задним ходом соответственно, режимы 3 и 4 обеспечивают торможение модели. Упор гребного винта K_{px} , соответствующий свободному самоходу модели, обозначен буквой A (область 1).

Значения боковой силы на гребном винте модели, буксируемой с нулевым углом дрейфа, приведены на рис. 5. Данные также представлены в универсальной форме, т. е.

$$K_{py} = \frac{P_y}{\rho D_p^2 (V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2)}. \quad (3)$$

Универсальная поступь сохранялась той же, что и в формуле (2).

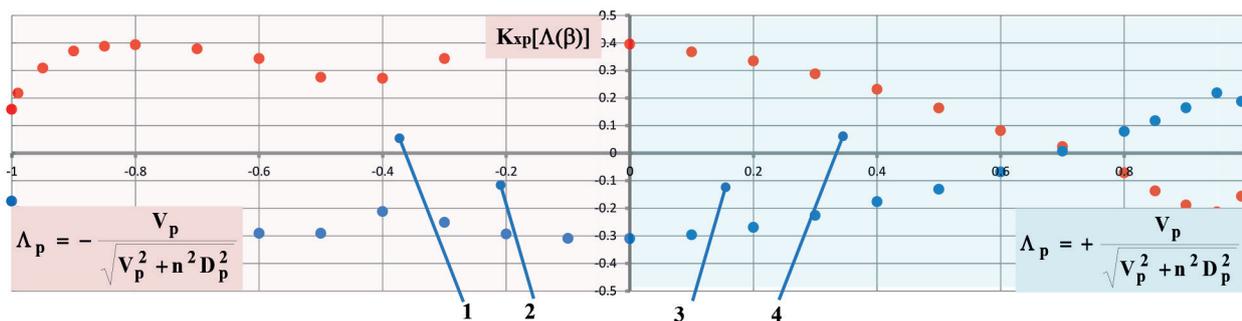


Рис. 4. Значения универсального упора гребного винта:
1, 2 — торможение модели; 3 — движение модели задним ходом;
4 — движение модели передним ходом

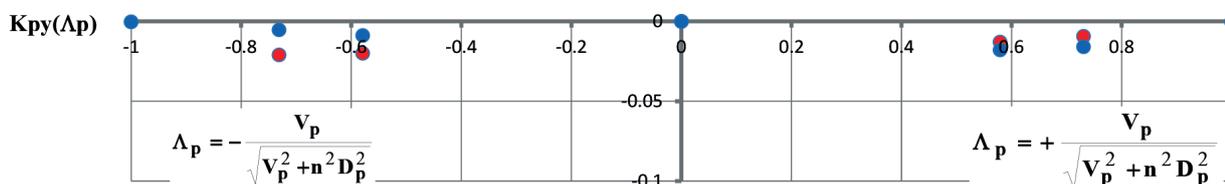


Рис. 5. Значения универсальной боковой силы на гребном винте

Сравнивая значения, приведенные на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

- боковая сила на винте принимает нулевые значения при швартовном режиме работы и при движении с застопоренным винтом;
- при значениях поступи, близких к рабочим, боковая сила отлична от нуля и сопоставима с соответствующими значениями для упора, однако обе составляющие малы по сравнению со значениями упора на швартовых.

Универсальные коэффициенты на гребном винте модели для случая движения с произвольным углом дрейфа. Расчетная оценка влияния угла дрейфа на величину упора гребного винта была выполнена на основании следующих рассуждений. Если при изменении угла дрейфа скорость буксировки модели и частота вращения гребного винта остаются постоянными и равными значениям в условиях свободного самохода модели, то упор гребного винта при буксировке модели с углом дрейфа $\beta = 90^\circ$ (см. рис. 4, точка B) будет соответствовать упору при нулевом значении поступи. Полагая, что при изменении угла дрейфа поступь гребного винта изменяется по закону:

$$\Lambda_{px}(\beta) = \frac{V_0 \cdot \cos \beta}{\sqrt{(V_0 \cos \beta)^2 + n_p^2 D_p^2}}, \quad (4)$$

а упор гребного винта остается функцией универсальной поступи:

$$K_{px}(\beta) = K_{px}[\Lambda_{px}(\beta)], \quad (5)$$

можно рассчитать изменение универсального упора, обусловленное изменением угла дрейфа. Результаты расчетной оценки $K_{px}(\beta)$ показаны на рис. 6, откуда следует, что величина упора гребного винта на переднем ходу возрастает от значения $K_{px} = 0,09$ при $\beta = 0^\circ$ до $K_{px} = 0,4$ при $\beta = 90^\circ$. При работе гребного винта на задний ход те же значения будут следующие: $K_{px} = 0,05$ при $\beta = 0^\circ$ и $K_{px} = 0,3$ при $\beta = 90^\circ$. Аналогичные рассуждения будут справедливы и для другой начальной поступи. Следует отметить, что влияние угла дрейфа на величину упора гребного винта максимально при режимах 3 и 4 (см. рис. 4) его работы. При режимах 1 и 2 работы величина упора гребного винта от частоты вращения практически не зависит.

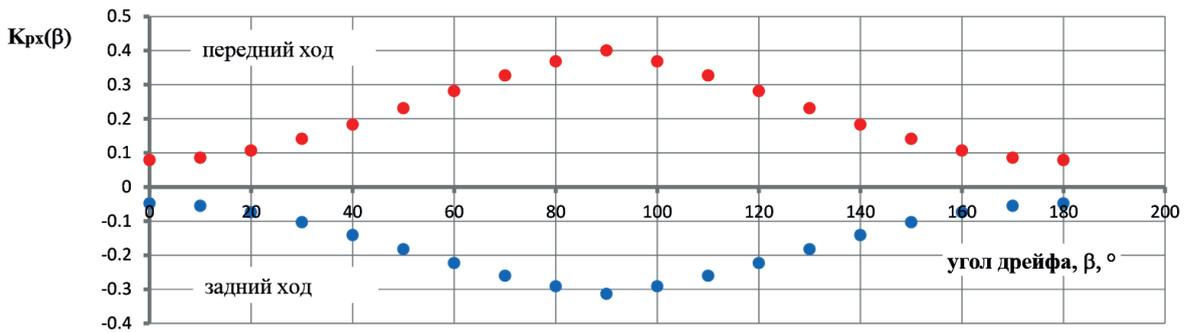


Рис. 6. Значения универсального упора гребного винта при различных углах дрейфа

При оценке значений универсальной боковой силы на гребном винте использовались те же значения характерных величин, что и при оценке упора, т. е. V_0 и n_p соответствовали условию свободного самохода. В качестве характерной скорости использовалась проекция скорости на ось «у», в связанной с моделью системе координат. Формула для расчета универсальной боковой силы имела вид

$$K_{py} = \frac{P_y}{\rho D_p^2 ((V_0 \sin \beta)^2 + n_p^2 D_p^2)}, \quad (6)$$

Результаты расчетов K_{py} при различных значениях угла дрейфа приведены на рис. 7, откуда следует, что влияние поступи гребного винта на величину боковой силы невелико. При работе гребного винта на передний ход (красные точки) боковая сила на винте достигает максимальных значений при углах дрейфа 110° и 250° и составляет:

$$K_{py} = 0,2 \text{ — при } \beta = 110^\circ;$$

$$K_{py} = 0,3 \text{ — при } \beta = 250^\circ,$$

что сопоставимо с величиной упора гребного винта на швартовых.

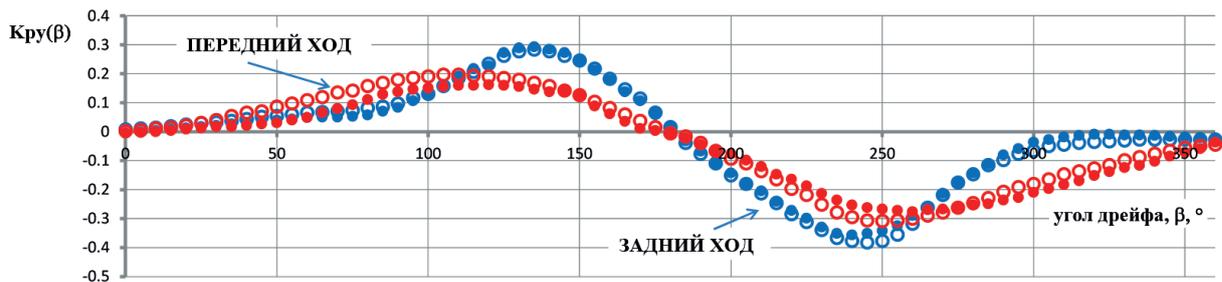


Рис. 7. Значения универсальной боковой силы на гребном винте при различных углах дрейфа

При работе гребного винта на задний ход боковая сила на винте достигает максимального значения при углах дрейфа 140° и 240° и составляет:

$$K_{py} = 0,3 \text{ — при } \beta = 140^\circ;$$

$$K_{py} = 0,38 \text{ — при } \beta = 240^\circ.$$

При работе гребного винта в швартовном режиме боковая сила близка к нулю.

При застопоренном винте величина боковой силы на винте определится величиной нагрузки гребного винта, определяемой формулой (1).

Использование универсальных коэффициентов для расчета упора и боковой силы на гребном винте. Если построить значения универсальной боковой силы на гребном винте, выбрав в качестве характерных частоту вращения гребного винта, равную соответствующему значению при свободном самоходе, а в качестве характерной скорости хода — ее проекцию на ось «у» в связанной с моделью системе координат, то получим выражение для универсальной боковой силы явно не зависящей от угла дрейфа, т. е.

$$K_{py} [\Lambda_p (\beta)] = \frac{k_{1y} (J_{p0})}{\Lambda_p (\beta)^2 + 1}, \quad (7)$$

где $k_{1y} (J_{p0})$ — упор гребного винта при движении в режиме свободного самохода; $\Lambda_p (\beta)$ — универсальная поступь гребного винта при текущем угле дрейфа, т. е.

$$\Lambda_{py} (\beta) = \frac{V_0 \cdot \sin \beta}{\sqrt{(V_0 \sin \beta)^2 + n^2 \cdot D_p^2}}. \quad (8)$$

Результаты обработки экспериментальных данных, построенные по универсальной поступи для движения модели передним и задним ходом при различной частоте сращения гребного винта, показаны на рис. 8. Приведенные кривые $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ в явном виде не содержат угла дрейфа, а влияние частоты вращения гребного винта незначительно.

Зависимость $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ от универсальной поступи $\Lambda_p (\beta)$ двузначна. Максимальные значения поступи соответствуют углам дрейфа $\beta = 90^\circ$ и $\beta = 270^\circ$ (см. точки на рис. 8). Для положительной поступи верхние ветви кривых соответствуют углам дрейфа $0^\circ \leq \beta < 90^\circ$, а нижние — соответствуют углам дрейфа $90^\circ \leq \beta < 180^\circ$. Для отрицательной поступи нижние ветви кривых соответствуют углам дрейфа $180^\circ \leq \beta < 270^\circ$, а верхние — углам дрейфа $270^\circ \leq \beta < 360^\circ$. Вид кривых определяется значением поступи при нулевом угле дрейфа $\Lambda_p (0)$. С увеличением поступи $\Lambda_p (0)$. Предельные значения $\Lambda_p (\beta)$ увеличиваются, стремясь к ± 1 .

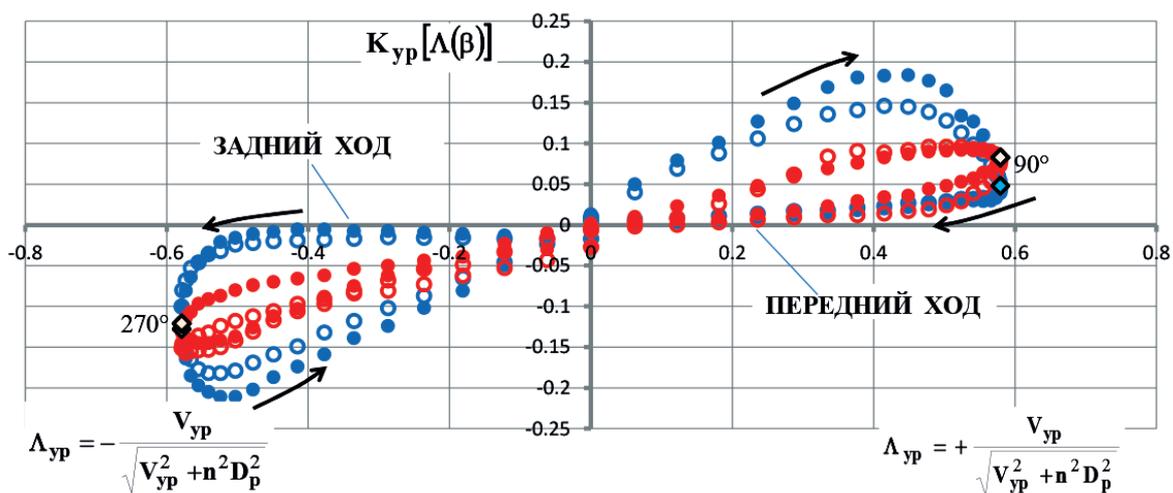


Рис. 8. Значения универсальной боковой силы на гребном винте, построенные по приведенной поступи

Используя полученную зависимость, можно рассчитать значение боковой силы на гребном винте натурного судна. Формула для расчета будет иметь вид

$$P_{yp} = K_{py} [\Lambda_p (\beta)] \cdot (\Lambda_p (\beta)^2 + 1) \rho n_p^2 D_p^4, \quad (9)$$

где $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ — значение универсальной боковой силы на гребном винте при текущем значении угла дрейфа; $\Lambda_p (\beta)$ — универсальная поступь гребного винта; n — частота вращения гребного винта при условии свободного самохода с нулевым углом дрейфа; D_p — диаметр гребного винта.

Выводы (Summary)

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Боковая сила на гребном винте может считаться малой только при движении судна с углами дрейфа 0° и 180° . При углах дрейфа, близких к лаговым значение боковой силы сопоставимо по величине с упором гребного винта.
2. Боковая сила на гребном винте достигает наибольших значений при работе винта на задний ход.
3. Величину боковой силы на гребном винте необходимо учитывать при расчете кинематических параметров движения судна, особенно при снижении скорости хода, как в условиях тихой воды, так и при ветре.

Авторы выражают благодарность мастеру лаборатории № 26 Е. А. Лысенкову и сотруднику сектора В. И. Левченко за проектирование и изготовление уникального динамометра, позволившего провести уникальные измерения боковой силы на гребном винте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. — Л.: Судостроение, 1973. — С. 233–241.
2. *Fugino M.* Maneuverability in Restricted Waters: State of the Art / M. Fugino. — University of Michigan, 1976. — 157 p.
3. *Inoue S.* Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring / S. Inoue, M. Hirano, K. Kijima // International Shipbuilding Progress. — 1981. — Vol. 28. — No. 321. — Pp. 112–125. DOI: 10.3233/ISP-1981-2832103.
4. *Hoof J. P.* The steering of a ship during the stopping manoeuvre / J. P. Hoof // International Shipbuilding Progress. — 1970. — Vol. 17. — No. 190. — Pp. 191–203. DOI: 10.3233/ISP-1970-1719003.
5. *Басин А. М.* Теория и расчет гребных винтов / А. М. Басин, И. Я. Миниович. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 760 с.
6. *Кацман Ф. М.* Пропульсивные качества морских судов / Ф. М. Кацман, А. Ф. Пустошный, В. М. Штумпф. — Л.: Судостроение, 1972. — 510 с.
7. *Русецкий А. А.* Судовые движители / А. А. Русецкий, М. М. Жученко, О. В. Дубровин. — Л.: Судостроение, 1971. — 287 с.
8. *Бавин В. Ф.* Гребные винты. Современные методы расчета / В. Ф. Бавин, Н. Ю. Завадовский, Ю. Л. Левковский, В. Г. Мишкевич. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
9. *Гофман А. Д.* Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А. Д. Гофман. — Л.: Изд. Судостроение, 1988. — С. 125–129.
10. *Миниович И. Я.* Действие судового гребного винта в косом потоке / И. Я. Миниович // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. — 1946. — Вып. 14.
11. *Гречин М. А.* Торможение судов при движении по криволинейной траектории / М.А. Гречин // Труды ЦНИИМФ. — 1972. — Вып. 153.
12. *Blanke M.* Dynamic model for thrust generation of marine propellers / M. Blanke, K. P. Lindegaard, T. I. Fossen // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33. — Is. 21. — Pp. 353–358. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37100-8.
13. *Mofidi A.* Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller / A. Mofidi, P. M. Carrica // Computers & fluids. — 2014. — Vol. 96. — Pp. 191–203. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.03.017.
14. *Chang P. A.* Propeller forces and structural response due to crashback / P. A. Chang, M. Ebert, Y. L. Young, Z. Liu, K. Mahesh, H. Jang, M. Shearer // 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. — ONR, 2008.
15. *Badoe C. E.* Influence of drift angle on the computation of hull-propeller-rudder interaction / C. E. Badoe, A. B. Phillips, S. R. Turnock // Ocean engineering. — 2015. — Vol. 103. — Pp. 64–77. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.059.
16. *Guo H.* Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship / H. P. Guo, Z. J. Zou, Y. Liu, F. Wang // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 162. — Pp. 259–273. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.035.

17. Martin J. E. Validation of a propeller model for maneuvering applications / J. E. Martin, A. Mofidi, T. Michael, P. M. Carrica // *Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp.* — 2015. — Vol. 15.
18. Vartdal B. J. Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings / B. J. Vartdal, T. Gjestland, T. I. Arvidsen // *First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim Norway.* — 2009. — Pp. 475–481.
19. Лебедева М. П. Боковая сила на гребном винте при произвольном движении судна / М. П. Лебедева // *Труды НТО XIV Крыловские чтения.* — СПб.: ФГУП «Крыловский научный центр», 2013.
20. Van Lammeren W.P.A. Ostervald. The Wageningen B — Screw Series / W. P. A. van Lammeren, J.D. van Manen, M. W. C. Ostervald. — 1969. — Vol. 77. — Is. 8. — Pp. 269–317.

REFERENCES

1. Voitkunskii, Ya. I., R. Ya. Pershits, and I. A. Titov. *Spravochnik po teorii korablya.* L.: Izd. Sudostroenie, 1973. 233–241.
2. Fugino, M. *Maneuverability in Restricted Waters: State of the Art.* University of Michigan, 1976.
3. Inoue, Shosuke, Masayoshi Hirano, and Katsuro Kijima. “Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring.” *International Shipbuilding Progress* 28.321 (1981): 112–125. DOI: 10.3233/ISP-1981-2832103
4. Hooft, J. P. “The steering of a ship during the stopping manoeuvre.” *International Shipbuilding Progress* 17.190 (1970): 191–203. DOI: 10.3233/ISP-1970-17 190034.
5. Basin, A. M., and I. Ya. Miniovich. *Teoriya i raschet grebnykh vintov.* L.: Sudpromgiz, 1963.
6. Katsman, F. M., A. F. Pustoshnyi, and V.M. Shtumpf. *Propul'sivnye kachestva morskikh sudov.* L.: Sudostroenie, 1972..
7. Rusetskii, A. A., M. M. Zhuchenko, and O.V. Dubrovin. *Sudovye dvizhiteli.* L.: Sudostroenie, 1971.
8. Bavin, V. F., N. Yu. Zavadovskii, Yu.L. Levkovskii, and V.G. Mishkevich. *Grebnye vinty. Sovremennye metody rascheta.* L.: Sudostroenie, 1983.
9. Gofman, A. D. *Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna.* L.: Izd. Sudostroenie, 1988. 125–129.
10. Miniovich, I. Ya. “Deistvie sudovogo grebnogo vinta v kosom potoke.” *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova* 14 (1946).
11. Grechin, M. A. “Tormozhenie sudov pri dvizhenii po krivolineinoy traektorii.” *Trudy TsNIIMF* 153 (1972).
12. Blanke, Mogens, Karl-Petter Lindegaard, and Thor I. Fossen. “Dynamic model for thrust generation of marine propellers.” *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000): 353–358. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37100-8
13. Mofidi, Alireza, and Pablo M. Carrica. “Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller.” *Computers & fluids* 96 (2014): 191–203. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.03.017
14. Chang, P. A., M. Ebert, Y. L. Young, Z. Liu, K. Mahesh, H. Jang, and M. Shearer. “Propeller forces and structural response due to crashback.” *27th Symposium on Naval Hydrodynamics.* ONR, 2008.
15. Badoe, Charles E., Alexander B. Phillips, and Stephen R. Turnock. “Influence of drift angle on the computation of hull–propeller–rudder interaction.” *Ocean engineering* 103 (2015): 64–77. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.059.
16. Guo, Hai-peng, Zao-jian Zou, Yi Liu, and Feng Wang. “Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship.” *Ocean Engineering* 162 (2018): 259–273. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.035
17. Martin, J. Ezequiel, Alireza Mofidi, Thad Michael, and Pablo M. Carrica. “Validation of a propeller model for maneuvering applications.” *Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp.* Vol. 15. 2015.
18. Vartdal, Bjørn Johan, Tormod Gjestland, and Terje Ingvar Arvidsen. “Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings.” *First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim Norway.* 2009. 475–481.
19. Lebedeva, M. P. “Bokovaya sila na grebnom vinte pri proizvol'nom dvizhenii sudna.” *Trudy NTO XLV Krylovskie chteniya.* FGUP «Krylovskii nauchnyi tsentr», 2013.
20. Van Lammeren, W. P. A., J. D. Van Manen, and M. W. C. Oosterveld. “The Wageningen B-screw series.” 77.8 (1969): 269–317.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедева Марина Петровна —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: imp45@yandex.ru, lebedevamp@gumrf.ru

Вишневский Леонид Иосифович —
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет
190008, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: vishli@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedeva, Marina P. —
PhD,
Senior Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: imp45@yandex.ru, lebedevamp@gumrf.ru

Vishnevskii, Leonid I. —
Dr. of Technical Sciences,
Senior Researcher
St. Petersburg State Marine Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190008,
Russian Federation
Krylov State Research Centre
44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: vishli@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 14 мая 2019 г.
Received: May 14, 2019.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572

ENERGY EFFICIENCY OF AIR-INDEPENDENT MICRO-GAS-TURBINE PLANT OF COMPLEX CYCLES FOR THE UNDERWATER EQUIPMENT

V. T. Matviienko¹, V. A. Ocheretianyi², A. V. Dologlonyan³

¹—Nakhimov Black Sea Naval School, Sevastopol, Russian Federation

²—Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

³— Institute of nature and technical systems, Sevastopol, Russian Federation

The underwater equipment will be played an essential role in investigation, arrangement both further operation of fields, and minerals transportation, on the Arctic shelf with severe ice conditions. Possibilities of the underwater equipment substantially depend on power equipment to carry out both transport, and technological functions. Among different types of power stations the closed-cycle gas turbine plants (CCGTP) with big power density are perspective for these purposes. The characteristics analysis of CCGTPs operating cycles of traditional schemes is made and CCGTP with heat recovery is selected as basic one as the most economical in comparison with CCGTP of a simple cycle and structurally preferable for the micro-gas-turbine unit using organic fuel in a single-circuit scheme with oxygen as an oxidizer. The methods of complicating the CCGTP cycles are considered in the paper for the purpose of further increasing the installation profitability and, as a result, more rational use of the oxidizer stock determining duration of underwater navigation. The direction of deeper utilization of warmth of the CCGTP exhaust gases by means of their partial transformation into mechanical work in the overexpansion turbine is chosen. The turbo-compressor utilizer (TCU) consisting of the overexpansion turbine driving the pressurizing compressor and cooler of gases between them joins the CCGTP exhaust. The next way for increasing the efficiency of the CCGTP with heat recovery and TCU is to transfer warmth regenerator in the TCU behind the overexpansion turbine. It is established that profitability of CCGTP with TCU and heat recovery is 15–25% higher in comparison with the basic CCGTP with heat recovery, at the same time, the power density increases by an average of 1,5 times. Also profitability of CCGTP with TCU and heat recovery has an intermediate position without power density increase. In terms of profitability and due to lower values of pressure ratio in the microturbine compressor it is reasonable to apply CCGTP with TCU and heat recovery.

Keywords: closed-cycle gas turbine plant, microturbine, heat recovery, overexpansion turbine, turbo-compressor utilizer.

For citation:

Matviienko, Valerii T., Vladimir A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Energy efficiency of air-independent micro-gas-turbine plant of complex cycles for the underwater equipment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.3 (2019): 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.

УДК 621.438

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

В. Т. Матвеевко¹, В. А. Очеретяный², А. В. Дологлонян³

¹— Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

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

³— ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Российская Федерация

Отмечается, что в связи с тяжелыми ледовыми условиями на Арктическом шельфе в разведке, обустройстве, эксплуатации месторождений и транспортировке полезных ископаемых существенную роль будет играть подводная техника, обладающая необходимой энергетической оснащенностью для обеспечения транспортных и технологических функций. Среди различных типов энергоустановок для этих целей перспективными являются замкнутые газотурбинные установки, обладающие большой удельной мощностью. Выполнен анализ характеристик рабочих циклов замкнутых газотурбинных установок традиционных схем, в качестве базовой выбрана замкнутая газотурбинная установка с регенерацией теплоты как наиболее экономичная по сравнению с ЗГТУ простого цикла и конструктивно предпочтительная для микрогазотурбинной установки, работающей на органическом топливе по одноконтурной схеме с кислородом в качестве окислителя. Рассмотрены методы усложнения циклов замкнутых газотурбинных установок с целью дальнейшего повышения экономичности установки и, как следствие, более рационального использования запаса окислителя, определяющего длительность подводного плавания. Выбрано направление более глубокой утилизации теплоты выхлопных газов замкнутых газотурбинных установок путем частичного их превращения в механическую работу в турбине перерасширения. К выхлопу присоединяется турбокомпрессорный утилизатор, состоящий из турбины перерасширения, приводящей дожимающий компрессор, и охладителя газов между ними. Рассмотрен также способ повышения эффективности замкнутых газотурбинных установок с регенерацией теплоты с турбокомпрессорного утилизатора как перенос регенератора теплоты в турбокомпрессорный утилизатор за турбину перерасширения. Установлено, что экономичность замкнутых газотурбинных установок с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты выше по сравнению с базовой замкнутой газотурбинной установкой с регенерацией теплоты на 15–25 %, при этом удельная мощность увеличивается в среднем в 1,5 раза. Отмечается, что экономичность замкнутой газотурбинной установки с регенерацией и турбокомпрессорным утилизатором занимает промежуточное положение без увеличения удельной мощности. По экономичности и в силу меньших значений степени повышения давления в компрессоре микротурбины целесообразно применять замкнутые газотурбинные установки с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор.

Для цитирования:

Матвеев В. Т. Энергоэффективность воздуонезависимых микрогазотурбинных установок сложных циклов для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.

Введение

Освоение природных богатств Арктического шельфа, связанное с наличием тяжелых ледовых условий, требует разработки новых технологий и технических решений. Технологии освоения шельфа незамерзающих морей только частично применимы для подледной разведки и обустройства месторождений, добычи и транспортировки полезных ископаемых. В условиях Арктики в освоении месторождений шельфа морей и океанов существенная роль отводится подводной технике, выполняющей как технологические, так и эксплуатационные функции.

Возможности подводной техники в значительной степени зависят от энергетической оснащенности аппаратов. Среди различных типов энергоустановок [1] вызывают интерес замкнутые воздуонезависимые газотурбинные установки сложных циклов как более энергоэффективные, способные в одноконтурном варианте работать на органических видах топлива с кислородом в качестве окислителя. Поэтому необходимы исследования термодинамических процессов воздуонезависимых газотурбинных установок сложных циклов для определения оптимальных параметров, схемных решений и их характеристик с учетом допустимых технологических возможностей их создания для оснащения ими подводной техники, обладающей высокой эффективностью и специальными возможностями.

В работе [2] обоснована перспективность применения воздуонезависимых энергетических установок (ВНЭУ) на базе газотурбинных двигателей (ГТД), работающих по замкнутому циклу. Рассмотрены методы усложнения рабочего цикла замкнутых газотурбинных установок (ЗГТУ) простого цикла с целью повышения экономичности двигателя и, как следствие, более рациональ-

ного использования запаса окислителя, определяющего длительность подводного плавания [3]. Усложнение рабочего цикла ЗГТД выполнено за счет использования регенерации теплоты выхлопных газов (рис. 1), а также применения турбины перерасширения (рис. 2) [4]–[6]. Рабочим телом в двигателе является смесь продуктов сгорания органического топлива с окислителем — кислородом O_2 . Исследования рабочего процесса в ЗГТУ проводились при горении органического топлива в рабочем теле с объемной долей кислорода, равной не менее 25 %, что обеспечивает сгорание топлива подобным горению в среде воздуха [7]. Термодинамические характеристики базовых тепловых схем и их рабочих процессов в ЗГТД, работающих на органическом топливе и окислителе-кислороде, определялись применительно к микрогазотурбинным установкам для подводной техники.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Характеристики базовых замкнутых микрогазотурбинных установок (ЗМГТУ).

Схемы замкнутых одноконтурных ЗМГТУ, работающих на органическом топливе, приведены на рис. 1 и 2. В схеме рис. 1 выхлопные газы за турбиной T охлаждаются в регенераторе (рекуператоре), отдавая теплоту рабочему телу перед камерой сгорания $КС$, и далее — в охладителе газа $ОГ$ с сепаратором влаги. Перед компрессором охлажденные выхлопные газы в смесителе $СМ$ подпитываются кислородом. Излишки CO_2 в рабочем теле в барботере $Б$ растворяются в воде и откачиваются за борт.

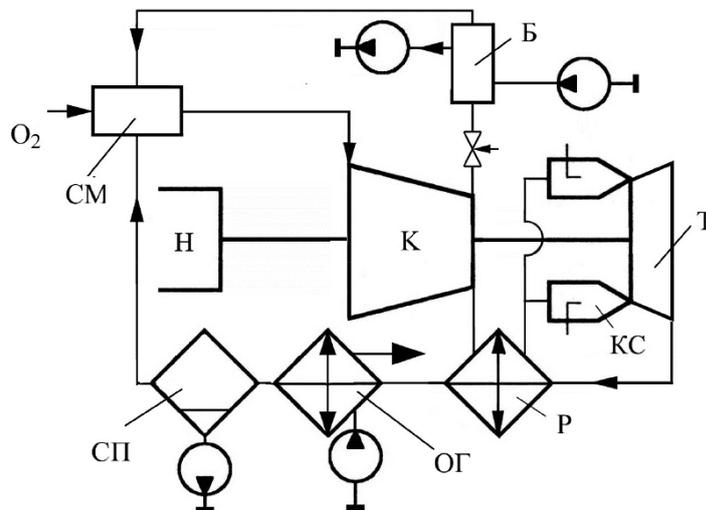


Рис. 1. Схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты:
 K — компрессор; T — турбина; $КС$ — камера сгорания;
 P — регенератор; $ОГ$ — охладитель газа; $СМ$ — смеситель;
 H — нагрузка; $СП$ — сепаратор влаги; $Б$ — барботер

При схеме рис. 2 выхлопные газы после турбины T поступают в турбину перерасширения ($ТП$), которая приводит дожимающий компрессор ($ДК$), посредством которого за турбиной T создается пониженное давление, увеличивающее мощность турбины. Охладитель газа $ОГ1$ перед $ДК$ может выполнять функцию теплофикационного теплообменника. Далее выхлопные газы поступают в компрессор двигателя так же, как в схеме рис. 1.

При определении характеристик циклов ЗМГТУ параметры элементов турбомашин и аппаратов выбирались с учетом масштабного фактора, характерного для микрогазотурбинных двигателей [8]. Для начальной температуры газов $T_3 = 1373$ К использовалось охлаждение турбины. В настоящее время для микротурбин оптимальная степень регенерации $\sigma = 0,8$. Температуру газов на входе в компрессор $T_1 = 313$ К можно получить при нахождении аппарата в подводном положении.

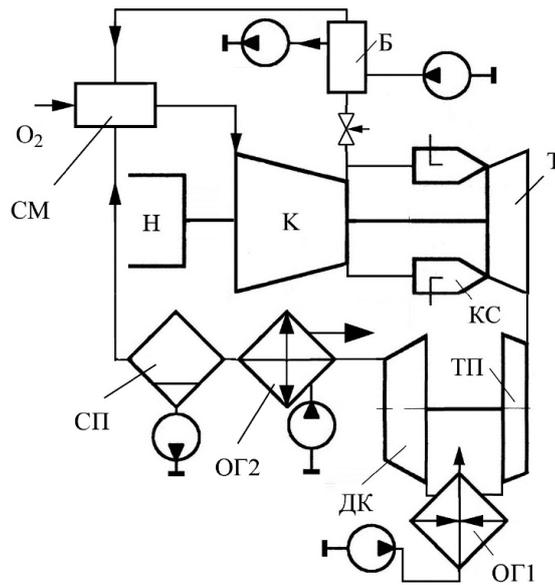


Рис. 2. Схема ЗМГТУ с турбиной перерасширения:
 К — компрессор; Т — турбина; КС — камера сгорания;
 ТП — турбина перерасширения; ДК — дожимающий компрессор;
 ОГ1 — охладитель газа (котел утилизатор); СМ — смеситель;
 Б — барботер; Н — нагрузка; СП — сепаратор влаги

На рис. 3 показаны характеристики циклов ЗМГТУ с регенерацией теплоты (Р) и ЗМГТУ с турбиной перерасширения (П + ТП). Для сравнения на рис. 3 приведены характеристики ЗГТУ простого цикла (П) при $T_3 = 1373 \text{ K}$, $\sigma = 0,8$, $\pi_{\text{дк}} = 2,25$, рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

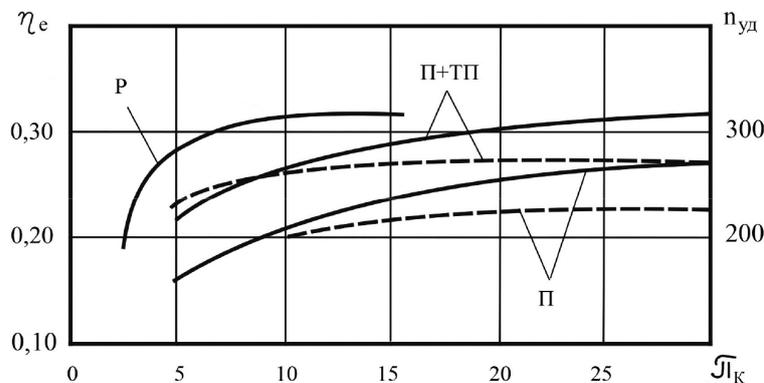


Рис. 3. Зависимости КПД (η_e) и удельной мощности ($n_{\text{уд}}$) от степени повышения давления для ЗМГТУ с ТП (П + ТП), ЗМГТУ с регенератором и простого цикла

Условные обозначения:

η_e — сплошные линии; $n_{\text{уд}}$ — пунктирные линии

Из рис. 3 видно, что КПД ЗГТУ с регенерацией и ЗГТУ с ТП примерно равны и позволяют повысить КПД установки на 15–20 %. Поэтому ЗМГТУ с регенерацией теплоты примем за базовую и рассмотрим задачу дальнейшего повышения ее энергоэффективности для подводной техники.

Методы повышения энергоэффективности ЗМГТУ усложнением рабочих циклов. Повышение КПД ЗМГТУ с Р возможно за счет более глубокой утилизации теплоты выхлопных газов ГТД путем частичного ее превращения в механическую работу. К выхлопу микрогазотурбинного двигателя с регенерацией теплоты присоединяется турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ), со-

стоящий из турбины перерасширения, приводящей в действие дожимающий компрессор (ДК), и охладителя газов между ними. На рис. 4 показана схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты и турбокомпрессорным утилизатором. ДК создает пониженное давление за ТП и частично за турбиной двигателя, что увеличивает степень расширения газа в турбине, а, следовательно, увеличивает ее мощность и повышает КПД установки. Охладитель газа ОГ1 обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия газа. Одновременно ОГ1 может выполнять роль теплообменника-утилизатора для обеспечения объекта теплотой. Подготовка рабочего тела перед компрессором двигателя и удаление продуктов сгорания из контура выполняются так же, как и в схеме рис. 1.

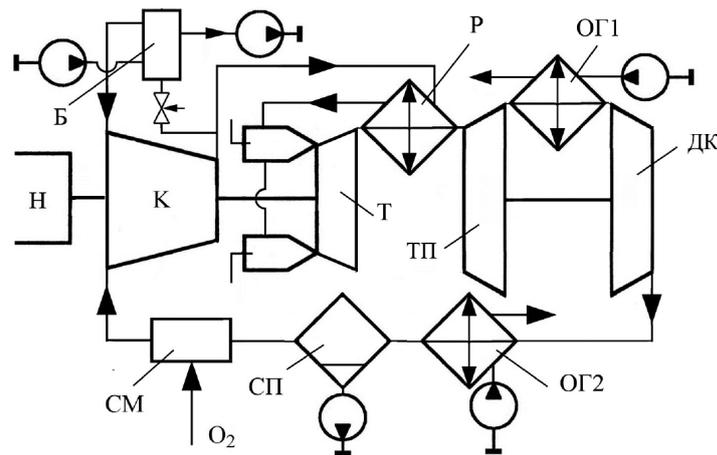


Рис. 4. Схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты и турбокомпрессорным утилизатором

Возможно построение схемы ЗМГТУ путем присоединения ТКУ непосредственно к турбине двигателя (рис. 5). Это дает возможность увеличить суммарную мощность турбин, расположить регенератор за турбиной перерасширения, так как за ней достаточно высокая температура газа [9], [10].

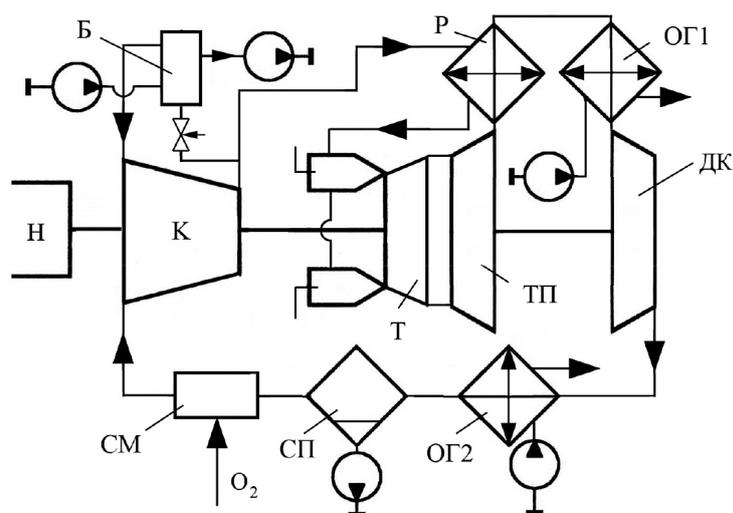


Рис. 5. Схема ЗМГТУ с турбокомпрессорным утилизатором, включающим регенератор теплоты

Результаты исследования работы ЗМГТУ сложных циклов. Анализ параметров циклов одноконтурных ЗМГТУ производился по имеющимся физико-математическим моделям [11] с новыми

параметрами рабочего тела (смеси газов), по стабильному давлению на входе в компрессор двигателя, которое поддерживалось посредством сброса излишка выхлопных газов из контура установки. Параметры узлов (турбомашин и оборудования) при исследовании циклов ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией применялись при расчетах в микротурбинных установках так же, как и в ЗМГТУ с регенерацией теплоты (см. рис. 1). Для определения оптимальных параметров циклов ЗМГТУ исследования проводились при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя и при различных начальных температурах газа T_3 в двигателе. На рис. 6 показаны характеристики циклов ЗГТУ с регенерацией и ТКУ, ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией, а также для сравнения ЗМГТУ с регенерацией при $T_3 = 1373$ К, $\sigma = 0,8$, $\pi_{dk} = 2,25$ (рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

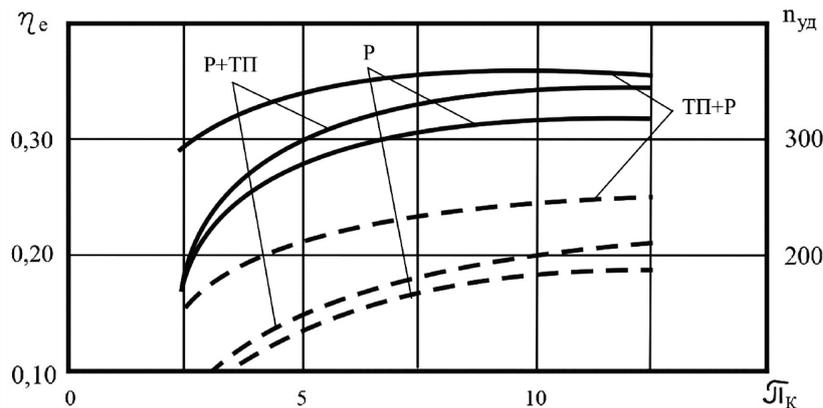


Рис. 6. Зависимости КПД и удельной мощности от степени повышения давления π_k для ЗМГТУ
Условные обозначения: η_e — сплошные линии; $n_{уд}$ — пунктирные линии

Проанализировав приведенные на рис. 6 зависимости было установлено, что при оптимальных степенях повышения давления π_k в ЗГТУ с ТКУ и регенерацией значения КПД более высокие, чем в ЗМГТУ с регенерацией на 15–25 %, удельная мощность увеличивается в среднем в 1,5 раза, что при прежней мощности установки позволяет уменьшить размеры проточных частей турбомашин и теплообменных аппаратов, расход топлива и, главное, окислителя, определяющего длительность пребывания объекта в подводном положении.

Экономичность ЗМГТУ с регенерацией и ТКУ выше, чем в ЗМГТУ с регенерацией, и занимает промежуточные значения по отношению к ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией. Удельная мощность в ЗМГТУ с регенерацией и ТКУ примерно такая же, как и в ЗМГТУ с регенерацией. Положительным является то, что введение в замкнутый контур ТКУ не требует переделки базового ГТД с регенерацией.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Усложнение циклов ЗМГТУ за счет применения турбины перерасширения и регенерации теплоты дает суммарный положительный эффект повышения энергоэффективности установки.
2. Усложнение цикла ЗМГТУ применением турбокомпрессорного утилизатора, включающего регенератор теплоты, не требует изменения параметров газогенератора базового двигателя.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00469.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышев, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и реч-

ного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33) — С. 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152.

2. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.

3. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

4. Матвеев В. Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В. Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. — 1997. — Т. 19 — № 4–5. — С. 81–85.

5. Матвеев В. Т. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты / В. Т. Матвеев [и др.] // Газотурбинные технологии. — 2005. — № 6 (41). — С. 42–44.

6. Bianchi M. A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering / M. Bianchi, G. Negri di Montenegro, A. Peretto, P. R. Spina // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2005. — Vol. 127. — Is. 3. — Pp. 599–605. DOI:10.1115/1.1765121

7. Бабурин А. В. Стабилизация пламени метана при замене окислительной среды воздуха на смесь (O₂+CO₂) / А. В. Бабурин // Технологии техносферной безопасности. — 2009. — № 3. — С. 2.

8. Манушин Э. А. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Э. А. Манушин, В. Е. Михальцев, А. П. Чернобровкин. — М.: Машиностроение, 1977. — 447с.

9. Пат. 180005 Российская Федерация, МПК F 02 С 6/02. Газотурбинная воздухонезависимая установка подводного аппарата / В. Т. Матвеев, А. В. Дологлонян, В. А. Очеретяный; заяв. и патентообладатель — Черноморское высшее военно-морское училище им. П. С. Нахимова. — № 2011111332; заяв. 04.04.2017; опубл. 30.05.2018, Бюл. № 16.

10. Bhargava R. K. Gas turbine bottoming cycles for cogenerative applications: Comparison of different heat recovery cycle solutions / R. K. Bhargava, M. Bianchi, A. De Pascale // ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. — American Society of Mechanical Engineers, 2011. — Pp. 631–641. DOI: 10.1115/GT2011-46236

11. Матвеев В. Т. Энергетические и приводные газотурбинные двигатели с блокированной силовой турбиной / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. Г. Андриец // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т. 3. — № 12 (63). — С. 33–37.

REFERENCES

1. Chernyshov, Evgeny Aleksandrovich, Elena Anatolievna Romanova, and Aleksey Dmitrievich Romanov. “Development of air independent power stations of submarines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152

2. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. “Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines.” *Shipbuilding* 4 (2012): 29–33.

3. Matviienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

4. Matveenko, V.T. “Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinykh dvigatelyakh s turbinoj pererasshireniya.” *Prom. teplotekhnika* 19.4–5 (1997): 81–85.

5. Matveenko, V.T., V.P. Troshin, A.A. Filonenko, and O.S. Kucherenko. “Privodnye GTD s turbokompresornym uutilizatorom i regeneratsiej teploty.” *Gazoturbinye tekhnologii* 6(41) (2005): 42–44.

6. Bianchi, M., G. Negri di Montenegro, A. Peretto, and P. R. Spina. “A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 127.3 (2005): 599–605. DOI:10.1115/1.1765121

7. Baburin, A. V. “Stabilization of the methane flame in course of replacing the air oxidation medium for synthetic mixture (O₂ + CO₂).” *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti* 3 (2009): 2.

8. Manushin, E. A., V. E. Mikhal'tsev, and A. P. Chernobrovkin. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok*. M.: Mashinostroenie, 1977.

9. Matveenko, V.T., A.V. Dologlonyan, and V. A. Ocheretyanyi. Gazoturbinnaya vozdukhonezavisimaya ustanovka podvodnogo apparata. RU 180005, IPC F 02 S 6/02. Russian Federation, assignee. Publ. 30 May 2018.

10. Bhargava, Rakesh K., Michele Bianchi, and Andrea De Pascale. "Gas turbine bottoming cycles for cogenerative applications: Comparison of different heat recovery cycle solutions." *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2011. DOI: 10.1115/GT2011-46236.

11. Matviinko, Valerii, Vladimir Ocheretuanij, and Alexandr Andriets. "Power and driving gas turbine engines with a blocked power turbine." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3.12(63) (2013): 33–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеевко Валерий Тимофеевич —

доктор технических наук, профессор
Черноморское высшее военно-морское ордена
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Дыбенко Павла 1, корп. А
e-mail: mvt3900@mail.ru

Очеретяный Владимир Анатольевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул.
Университетская, 33
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Дологлонян Андрей Вартазарович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБНУ «Институт природно-технических систем»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Ленина, 28
e-mail: dologlonyan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matviienko, Valerii T. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Nakhimov Black Sea Higher Naval School
1–A, Dybenko Pavla Str., Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: mvt3900@mail.ru

Ocheretianyi, Vladimir A. —

PhD, associate professor
Sevastopol State University
33, Universitetskaia Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Dologlonyan, Andrey V. —

PhD, associate professor
Institute of nature and technical systems
28, Lenina Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

Received: April 25, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581

SWITCHED RELUCTANCE DRIVE SRD-1000-1100 IN THE ELECTROMOTIVE SYSTEMS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

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

Very high demands concerning reliability, operational characteristics and functioning in full are being put on the modern ship electric drives. More than twenty years of experience in the progressive implementation of switched reluctance electric drives of auxiliary mechanisms on submarines and more powerful drives on the supply ship Victor Konetsky has qualitatively developed technologies for designing and producing the switched reluctance drives, successfully competing with permanent-magnet electric motors. The results of the preliminary design of the switched reluctance drive SRD 1000-1100 with a power of 1000 kW, 1100 rpm are considered in the paper. The basic principle of the electric propulsion system representing sectioning the executive control of the propulsion motor into several independently working parts is proposed. The distinctive features and advantages of the switched reluctance drive in comparison with an asynchronous motor are considered, and the oscillogram of a single-phase failure of the switched drive is also shown. The results of the preliminary design of the 1000 kW switched inductor drive have been illustrated. Besides, the structure of the switched reluctance drive 1000-1100, which is shown as the concept of building a complete electric drive, is considered. This concept includes the following aspects: the complete electric drive is based on the modular equipment, the sections separate control is organized, all intellectual control modules are connected by a common CAN network, etc. The parameters for comparing an asynchronous propulsion motor of Schorch company and switched reluctance drive 1000-1100 are shown in the table. Therefore, for propulsion systems there is a tendency to create the electric drive systems based on the switched reluctance motors.

Keywords: electric drive, propulsion electric motor, switched reluctance motors, permanent magnets, asynchronous motor.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Switched reluctance drive SRD-1000-1100 in the electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 573–581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

УДК 621:313:3

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ПРИВОД ВИП-1000-1100 В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

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

Рассмотрены требования, предъявляемые к современным судовым электроприводам, касающиеся надежности, эксплуатационных характеристик и функционирования в полном объеме. Проанализированы данные, подтвержденные более чем двадцатилетним опытом работы по поступательному внедрению вентильных индукторных электроприводов вспомогательных механизмов на подводных лодках и более мощных приводов на корабле-снабженце «Виктор Конецкий», который качественно развил технологии проектирования и производства вентильно-индукторных двигателей, успешно конкурирующих с электродвигателями с постоянными магнитами. В работе рассматриваются результаты аванпроекта вентиль-

но-индукторного привода 1000-1100 мощностью 1000 кВт, 1100 об/мин. Предлагается основной принцип построения системы электродвижения — секционирование исполнительного управления гребным электродвигателем на несколько независимо работающих частей. Рассмотрены отличительные особенности и преимущества вентильно-индукторного привода в сравнении с асинхронным двигателем, а также показана осциллограмма отказа одной фазы вентильного двигателя. Проиллюстрированы результаты предварительного проектирования вентильно-индукторного привода мощностью 1000 кВт. Кроме того, рассмотрена структура вентильно-индукторного привода 1000-1100, которая показана как концепция построения комплектного электропривода: комплектный электропривод строится на модульном оборудовании, организуется раздельное управление секциями, все интеллектуальные модули управления объединяются общей CAN-сетью и др. Параметры для сравнения асинхронного гребного двигателя фирмы Schorch и вентильно-индукторного привода 1000-1100 рассмотрены в таблице. Следовательно, для пропульсивных систем прослеживается тенденция создания систем электродвижения на основе вентильно-индукторных двигателей.

Ключевые слова: электропривод, гребной электрический двигатель, вентильно-индукторный двигатель, постоянные магниты, асинхронный двигатель.

Для цитирования:

Романовский В. В. Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 573–581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

Введение (Introduction)

К современным судовым электроприводам механизмов предъявляются следующие требования: высокая надежность, расширение периодов их функционирования без обслуживания и наблюдения, обеспечение оптимальных условий резервирования и постоянной готовности к действию, возможность автоматизации технологических процессов исполнительных механизмов, улучшение эффективности использования электромеханизмов на основе совершенствования механических характеристик, повышение величин ускорений в динамических режимах работы при плавном регулировании скорости, выбор оптимальных режимов технологических операций.

Более чем двадцатилетний опыт работы по поступательному внедрению [1] вентильных индукторных электроприводов (ВИП) вспомогательных механизмов на подводных лодках, а также более мощных приводов (2 МВт) на корабле-снабженце «Виктор Конецкий» и предприятиях промышленности позволил качественно развить технологии проектирования и производства вентильно-индукторных двигателей (ВИД), успешно конкурирующих с электродвигателями с постоянными магнитами (ПМ) на роторе. В машине с ПМ требуется защита от металлической пыли, она боится сильных электромагнитных полей и перегрева, и, следовательно, диапазон рабочих температур таких машин ограничен. При коротком замыкании обмотки отключение машины с ПМ от сети не устраняет проблему нагрева обмотки из-за протекания токов короткого замыкания. В этом случае машина может превратиться в самовозгорающийся объект.

В работе рассматриваются результаты аванпроекта ВИП-1000-1100 мощностью 1000 кВт, 1100 об/мин. Предлагается основной принцип построения [2] системы электродвижения (СЭД) — секционирование исполнительного управления гребным электродвигателем (ГЭД) на несколько независимо работающих частей, каждая из которых имеет свой собственный микропроцессорный контроллер и пульт оперативного управления. При этом управление каждой секцией ГЭД — автономное и независимое. Функционирование синхронизируется по датчикам положения ротора, которые, распараллеливая сигналы по всем секциям системы управления, обеспечивают суммирование электромагнитных моментов секций непосредственно на валу машины с достижением высокой надежности привода.

Возможность индивидуального или группового управления секциями упрощает как процедуру настройки привода (может выполняться посекционно), так и процедуру приемо-сдаточных испытаний. В последнем случае одна из секций, расположенных в первом [3] пакете, действует в качестве двигателя, нагрузкой для нее является секция, работающая генератором во втором па-

кете. Предлагаемая структура СЭД не требует изготовления дорогостоящего специализированного стенда для испытания ГЭД.

В работе противопоставлены основные особенности ВИД и асинхронного двигателя (АД), представлены эскизы ВИП мощностью 1000 кВт, а также рассмотрена концепция построения комплектного электропривода. Данный комплекс методов и средств дает возможность гарантированного оперативного создания ВИП-1000 кВт с внедрением их в ЭЭС с СЭД на кораблях-спасателях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Отличительные особенности вентильно-индукторного привода в сравнении с АД. Предлагаемый тип двигателя отличается конструктивной простотой и надежностью. На роторе двигателя отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Обмотка статора выполнена из сосредоточенных, concentрических катушек, и поэтому двигатель не требует ремонта и обслуживания по регламенту.

Особенность устройства ВИД и конструкции фазных обмоток определяют его высокую надежность и живучесть. Это одно из основных важных практических преимуществ ВИД по сравнению с традиционными типами электрических машин — при замыкании фазных обмоток или при межвитковом замыкании фазной обмотки АД выйдет из строя. Для предотвращения этого в асинхронных приводах предусматриваются специальные электронные защитные устройства, работоспособность которых в период эксплуатации подтверждается только при наступлении аварийной ситуации. Невозможность межфазного замыкания обмоток ВИД гарантируется конструкцией обмотки статора, не допускающей пересечения фазных катушек. При межвитковом замыкании [4] фазной катушки возникает режим «токового коридора», в который входит поврежденная фаза с выдачей сообщения о нештатном режиме на панель индикации. Этот режим имеет место при пусковых режимах и режимах работы при перегрузках. При необходимости блок управления с ВИД может работать в таком нештатном режиме при отключенных нескольких фазах.

Другим важным преимуществом ВИП, по сравнению с частотно-управляемым АД, является его многофазность, которая упрощает компоновку силовой части преобразователя и с учетом независимости работы фаз определяет беспрецедентную живучесть привода. Отказ одной или даже нескольких фаз не нарушает работу двигателя, так как при наличии некоторого резерва по току и напряжению фаз снижение выходной мощности частично или полностью компенсируется увеличением нагрузки фаз, оставшихся в работе. Указанный эффект показан на осциллограммах (рис. 1), полученных при работе пятифазного ВИП в пяти- и четырехфазном режимах.

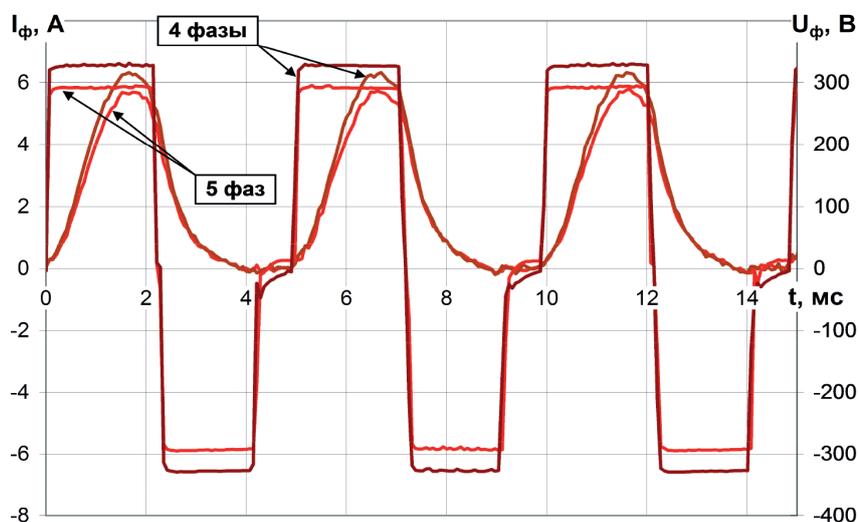


Рис. 1. Осциллограмма работы пятифазного ВИП в пяти- и четырехфазном режимах

Из осциллограмм видно, что скоростной режим работы не меняется (частота импульсов в обоих случаях одинакова). Отключение одной фазы компенсируется работой регулятора скорости, который поднимает напряжение фазы с 290 до 330 В, т. е. на 14 %. Примерно на такой же процент возрастает амплитуда импульсов тока фазы. В результате средняя мощность фазы увеличивается на 30 %, а номинальная мощность на валу достигается четырьмя фазами.

Блок управления собирается из отдельных взаимозаменяемых модулей, а его конструкция обеспечивает доступность ко всем элементам схемы. При выходе из строя части каналов ВИД сохраняет свою работоспособность со снижением мощности [5], [6].

Основные преимущества ВИП, подтвержденные в результате многолетнего опыта разработок и исследований, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом:

- перегрузочная способность двигателя в пусковом режиме порядка четырехкратной номинальной величины вращающего момента и выше при правильном выборе элементной базы преобразователя;

- высокий КПД двигателя (для машин большой мощности порядка 97–98 %) и инвертора, так как он проектируется на низкую частоту 100–200 Гц, в отличие от преобразователя АД, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при частоте порядка 2000 Гц;

- конструкция магнитопроводов статора, ротора и катушечных обмоток двигателя проста ввиду отсутствия пересекающихся лобовых частей. Это, согласно данным источников [7], [8], свидетельствует о простой технологичности, низких материалоемкости, трудозатратах и стоимости при изготовлении, об увеличенном сроке надежности, долговечности и ремонтпригодности;

- ввиду отсутствия на роторе двигателя обмоток, отвод тепла не требуется (потери в стали ротора небольшие);

- пульсации вращающего момента двигателя сводятся к 2 % и менее посредством оптимизации контроля временными параметрами импульса напряжения и геометрии двигателя;

- живучесть ВИП увеличена из-за наличия магнитной независимости фазных обмоток в двигателе и электрической независимости фазных блоков в преобразователе питания. Повреждение одной или нескольких фаз, в отличие от АД, не приведет к частичной потере работоспособности привода, а всего лишь к частичному уменьшению мощности;

- в силовой цепи преобразователя практически исключаются сквозные короткие замыкания ввиду того, что в каждом плече стоит только один транзистор, а не два, как в преобразователе для АД. Предварительные эскизы проектирования ВИД [9] мощностью 1000 кВт приведены на рис. 2 и 3.

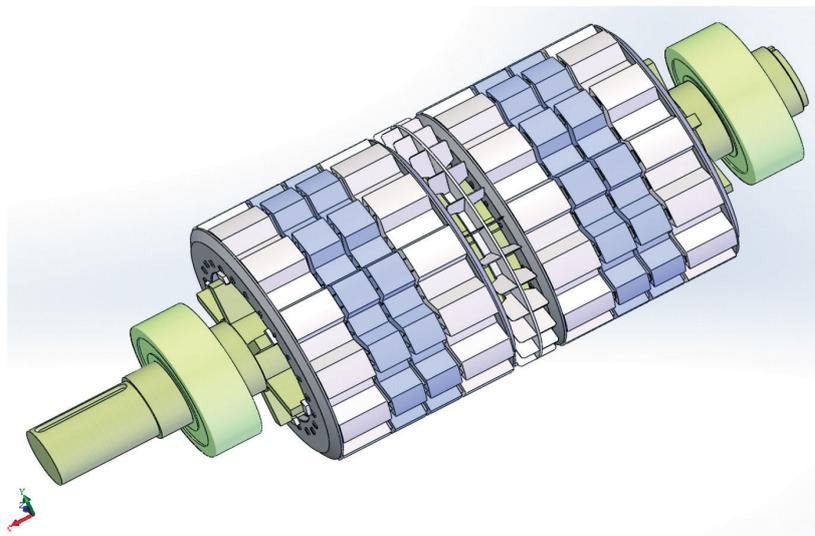


Рис. 2. Ротор ВИД: охлаждение двигателя жидкостное; внутренний воздух циркуляции через жидкостной радиатор посредством вентилятора

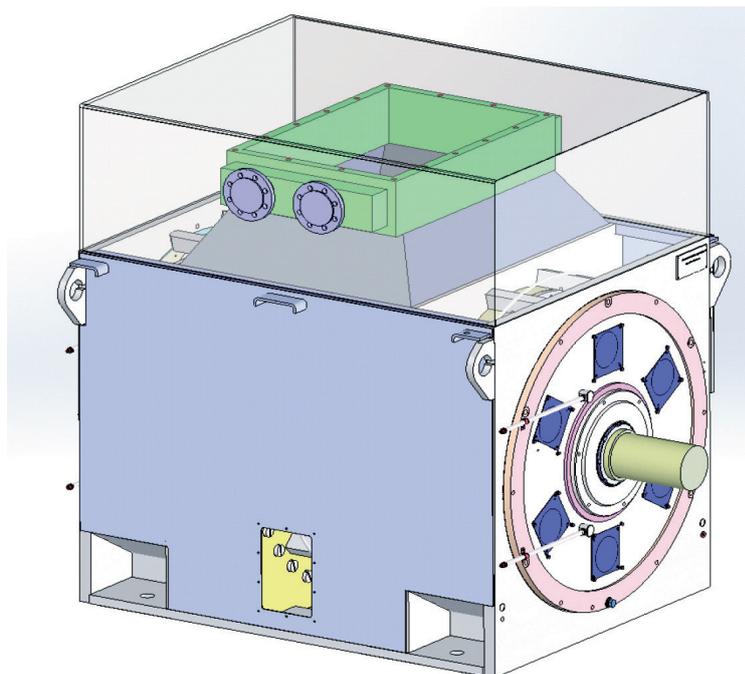


Рис. 3. ВИД в сборе с системой охлаждения

Структура ВИП-1000-1100. Концепция построения комплектного электропривода:

1. Комплектный электропривод ВИП-1000-1100 строится на модульном оборудовании: один комплект оборудования используется для управления двумя главными [10], [11] секциями машины (полуфазы A, B, C и полуфазы D, E, F), второй— для контроля дополнительными двумя секциями машины (полуфазы A', B', C' и полуфазы D', E', F'). Поэтому предлагается два блока преобразователей, каждый из которых осуществляет контроль управления одной из четырех секций машины.

2. С одного блока модулей преобразователей производится контроль над секциями в различных блоках машины, что дает возможность тестировать данные секции во время пусконаладочных испытаний электропривода. Организуется поочередный контроль над секциями: секцией первого пакета в двигательном режиме, секцией второго пакета в генераторном режиме. Датчик положения ротора допустим один на обе секции. На обеих секциях допускается наличие одного датчика положения ротора.

3. Интеллектуальные блоки управления (контроллеры, пульта управления секциями и контроллеры выпрямителей) соединены посредством CAN-сети. В нее включены: пара контроллеров блоков преобразователей, два пульта оперативного управления и контроллер выпрямителей.

4. Контроллер выпрямителей осуществляет кроме основных функций также функцию контроллера верхнего уровня управления приводом. Для этого он имеет блок дискретного ввода / вывода и интерфейс, например, MODBUS RTU.

5. Дискретные входы поступают сразу в оба шкафа комплектного ВИП, второй может работать на половинном моменте. Дискретные выходы [12], [13] индивидуальны для каждого шкафа, чем достигается разделение статусной информации по шкафам.

Предварительное проектирование в очередной раз подтвердило возможность реализации отечественной ГЭД на основе ВИП на мощности до 4–5 МВт.

В настоящее время российские проекты кораблей создаются в основном на основе разработок фирмы *Schorch*. Параметры АД [14] фирмы *Schorch* и электропривода ВИП-1000-1100 приведены в таблице. Данные по ВИП — предварительные и подлежат уточнению в соответствии с предъявляемыми техническими требованиями.

Сравнительные параметры асинхронного ГЭД и ВИД

Наименование параметра	Электропривод <i>Schorch</i> 8225623 (АД)	Электропривод ВИП-1000-1100
Номинальная мощность двигателя, кВт	1600	1000
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	1100
Диапазон регулирования, об/мин	94–1200	100–1200
Напряжение питания, В	2×960 (переменное синусоидальное)	640, однополярное пульсирующее (выпрямленное 400 В, 50 Гц, 3 ф)
Частота питающего напряжения, Гц	5–60	5–220
Количество фаз питающего напряжения	2×3	6
Ток в фазе, А	2×705	6×864
Максимальный пусковой ток, А	$3I_{НОМ}$	Не более $I_{НОМ}$
Пусковой момент, Н·м	$1,2M_{НОМ}$	$2M_{НОМ}$
Номинальный режим работы	S-продолжительный	S-продолжительный
Габаритные размеры (Д×Ш×В) с учетом длины вала, мм	2592×2022×2141	1930×1375×1710
Способ охлаждения	Жидкостное	Жидкостное
Степень защиты двигателя / коробки выводов, IP	IP55/IP55	IP55/IP55
Масса, кг	8800	6800
КПД, %	–	97,9
Номинальная мощность, кВт	–	–
Номинальное входное напряжение (род тока, амплитуда напряжения)	–	380 В, 50 Гц, 3 ф
Виды защит	–	Перегрузка по току, по превышению / снижению входного напряжения, по температуре подшипников, обмоток двигателя, силовых транзисторов и др.
Управление	–	Местное с панели блока управления, дистанционное при помощи RS-485
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	–	1600×800×2000 (два шкафа типа Ritall 2000×800×800)
Масса, кг	–	950
Климатическое исполнение IP	–	IP24
Способ охлаждения	–	Жидкостное
КПД, %	–	98

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В данной работе показана возможность создания ВИП-1000-1100 с внедрением в ЭЭС с СЭД на кораблях-спасателях.

2. При создании мощных электроприводов, как правило, дополнительно изготавливают полномасштабную машину, которую затем используют [15] в качестве нагрузочной и экспериментальной, но в данном случае в этом нет необходимости, как и при разработке индукторного ГЭД до 30 МВт для судов ледокольного класса.

3. Для успешного проектирования ВИД мощностью более 4–5 МВт необходимо совершенствование существующих компьютерных моделей, основанных на статистике реальных токов и напряжений, а также создание экспериментального стенда для получения новых методик, так как современные компьютерные лаборатории не учитывают, в частности, особенности нагрева обмоток шинного типа в индукторных машинах большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
2. Martin R. Electromagnetic considerations for a six-phase switched reluctance motor driven by a three-phase inverter / R. Martin, J. D. Widmer, B. C. Mecrow, M. Kimiabeigi, A. Mebarki, N. L. Brown // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2016. — Vol. 52. — Is. 5. — Pp. 3783–3791. DOI: 10.1109/TIA.2016.2564344.
3. Никифоров Б. В. Перспективы применения вентильных индукторных приводов в составе СЭД ДЭПЛ / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения. — 2013. — № 5. — С. 11–16.
4. Peng F. An asymmetric three-level neutral point diode clamped converter for switched reluctance motor drives / F. Peng, J. Ye, A. Emadi // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2016. — Vol. 32. — Is. 11. — Pp. 8618–8631. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2642339.
5. Arbab N. Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor / N. Arbab, W. Wang, C. Lin, J. Hearn, B. Fahimi // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2015. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 1209–1217. DOI: 10.1109/TEC.2015.2424400.
6. Никифоров Б. В. Расчет и проектирование ВИП-600 кВт для компрессоров горно-обогажительных комбинатов / Б. В. Никифоров, И. А. Квятковский // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения: материалы межотраслевого семинара. — Новочеркасск: ЮРПТУ (НПИ), 2014. — С. 97–105.
7. Лагода Ф. И. Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.
8. Sun W. Vibration effect and control of In-Wheel Switched Reluctance Motor for electric vehicle / W. Sun, Y. Li, J. Huang, N. Zhang // Journal of Sound and Vibration. — 2015. — Vol. 338. — Pp. 105–120. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.10.036.
9. Rahmanian E. Maximum Power Point Tracking in Grid Connected Wind Plant by Using Intelligent Controller and Switched Reluctance Generator / E. Rahmanian, H. Akbari, G.H. Sheisi // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2017. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.
10. Wang S.Y. Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy / S.Y. Wang, F.Y. Liu, J.H. Chou // Applied Soft Computing. — 2018. — Vol. 66. — Pp. 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.
11. Saha N. Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by Hybrid Many Optimizing Liaison Gravitational Search technique / N. Saha, S. Panda // Engineering science and technology, an international journal. — 2017. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 909–921. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.11.018.
12. Lin C. Analysis of Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machines due to Variable Speed Drives / C. Lin, S. Wang, M. Moallem, B. Fahimi, C. Tschida // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2016. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 582–590. DOI: 10.1109/TEC.2016.2638122.
13. Hua W. An inductance Fourier decomposition-based current-hysteresis control strategy for switched reluctance motors / W. Hua, J. Qi, M. Jia // AIP Advances. — 2017. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 056661. DOI: 10.1063/1.4977232.
14. Aiso K. Reluctance Magnetic Gear and Flux Switching Magnetic Gear for High Speed Motor System / K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — IEEE, 2017. — С. 2445–2452. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096470.
15. Mihic D.S. A new nonlinear analytical model of the SRM with included multiphase coupling / D.S. Mihic, M.V. Terzic, S.N. Vukosavic // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2017. — Vol. 32. — Is. 4. — Pp. 1322–1334. DOI: 10.1109/TEC.2017.2707587.

REFERENCES

1. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Prospects for the development of electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
2. Martin, Richard, James D. Widmer, Barrie C. Mecrow, Mohammad Kimiabeigi, Abdeslam Mebariki, and Neil L. Brown. "Electromagnetic considerations for a six-phase switched reluctance motor driven by a three-phase inverter." *IEEE Transactions on Industry Applications* 52.5 (2016): 3783–3791. DOI: 10.1109/TIA.2016.2564344.
3. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Perspektivy primeneniya ventil'nykh indukturnykh privodov v sostave SED DEPL." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i komplekсы spetsial'nogo naznacheniya* 5 (2013): 11–16.
4. Peng, Fei, Jin Ye, and Ali Emadi. "An asymmetric three-level neutral point diode clamped converter for switched reluctance motor drives." *IEEE Transactions on Power Electronics* 32.11 (2016): 8618–8631. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2642339.
5. Arbab, Nasim, Wei Wang, Chenjie Lin, Joseph Hearron, and Babak Fahimi. "Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 30.3 (2015): 1209–1217. DOI: 10.1109/TEC.2015.2424400.
6. Nikiforov, B.V., and I.A. Kvyatkovskii. "Raschet i proektirovanie VIP-600 kVt dlya kompressorov gorno-obogatitel'nykh kombinatov." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i komplekсы spetsial'nogo naznacheniya: materialy mezhotraslevogo seminar. Novocherkassk: YuRGPU (NPI), 2014. 97–105.*
7. Lagoda, F.I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.*
8. Sun, Wei, Yinong Li, Jingying Huang, and Nong Zhang. "Vibration effect and control of In-Wheel Switched Reluctance Motor for electric vehicle." *Journal of Sound and Vibration* 338 (2015): 105–120. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.10.036
9. Rahmanian, Ehsan, Hasan Akbari, and G. Hossein Sheisi. "Maximum power point tracking in grid connected wind plant by using intelligent controller and switched reluctance generator." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8.3 (2017): 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.
10. Wang, Shun-Yuan, Foun-Yuan Liu, and Jen-Hsiang Chou. "Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy." *Applied Soft Computing* 66 (2018): 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.
11. Saha, Nutan, and Sidhartha Panda. "Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by Hybrid Many Optimizing Liaison Gravitational Search technique." *Engineering science and technology, an international journal* 20.3 (2017): 909–921. DOI: 10.1016/j.jestech.2016.11.018.
12. Lin, Chenjie, Shiliang Wang, Mehdi Moallem, Babak Fahimi, and Colin Tschida. "Analysis of vibration in permanent magnet synchronous machines due to variable speed drives." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 32.2 (2016): 582–590. DOI: 10.1109/TEC.2016.2638122.
13. Hua, Wei, Ji Qi, and Meng Jia. "An inductance Fourier decomposition-based current-hysteresis control strategy for switched reluctance motors." *AIP Advances* 7.5 (2017): 056661. DOI: 10.1063/1.4977232.
14. Aiso, Kohei, Kan Akatsu, and Yasuaki Aoyama. "Reluctance magnetic gear and flux switching magnetic gear for high speed motor system." *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2017. 2445–2452. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096470.*
15. Mihic, Dragan S., Mladen V. Terzic, and Slobodan N. Vukosavic. "A new nonlinear analytical model of the SRM with included multiphase coupling." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 32.4 (2017): 1322–1334.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Никифоров Борис Владимирович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Макаров Арсений Михайлович —
аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Nikiforov, Boris V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Makarov, Arsenii M. —
Postgraduate
Supervisor:
Romanovsky, Viktor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 30 апреля 2019 г.
Received: April 30, 2019.*

DETERMINATION OF SHIPBOARD CABLES PARAMETERS FOR CALCULATING THE PULSE NOISE PROPAGATION AND CALCULATION ACCURACY ESTIMATION

M. A. Akhrestin¹, A. A. Vorshevsky², P. A. Vorshevsky²

¹ — St. Petersburg Maritime Bureau of Mechanical Engineering “Malachite”,
St. Petersburg, Russian Federation

² — St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

Nanosecond pulse noise in shipboard electrical system is generated by switching operations. The voltage pulses can lead to malfunction of electrical and electronic equipment with digital circuits. Pulse noise propagates in cables from the generation point to the equipment. It is important to estimate the pulse noise parameters on the sensitive equipment for obtaining electromagnetic compatibility. The purpose of this work is determination of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation and calculation accuracy estimation. Distributed cable parameters are required for nanosecond propagation model. The parameters can be calculated on the base of proposed approach taking into account the neighbouring cables (conductors) influence. The neighbouring cables (conductors) leads to increasing the distributed capacitance and decreasing the wave resistance. Wave resistances of propagation channels can be measured with pulse reflectometer on the base of measurement of voltage step reflection from the examined circuit. The travelling wave technique is used for nanosecond pulse propagation calculation. It can use ideal line and real cable model. Experimental measurements of pulse propagation can be performed with bursts (IEC61000-4-4) generator IPP-4000 and surge (IEC61000-4-5) generator IPP-1000. Pulses are generated in different circuits of cables. Voltage curves of initial pulse at the ends of the cable circuit are analyzed. The results of calculation and measurement lead to conclusion that it is enough to take into consideration only nearest cables (conductors) for wave resistance determination. Calculation inaccuracy is less than 10 %. Microsecond pulses do not fade in 100 m cables. At the end of the cable, doubling of the pulse amplitude is possible. Propagation of nanosecond pulses gives decreasing the amplitude, increasing the rise time and duration. This effect is less for cable with large cross sections of conductors. The results of wave resistances and pulse propagation calculation are useful for estimation of pulse noise influence on shipboard equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, pulse noise, propagation, shipboard cable, wave resistance, distributed parameter.

For citation:

Akhrestin, Mikhail A., Alexander A. Vorzhevsky, and Petr A. Vorzhevsky. “Determination of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation and calculation accuracy estimation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-582-591.

УДК 621.316.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ КАБЕЛЕЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА

М. А. Ахрестин¹, А. А. Воршевский², П. А. Воршевский²

¹ — АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследованы наносекундные импульсные помехи, возникающие в судовой сети при коммутациях, способные вызвать сбои в работе электронного оборудования с цифровыми схемами, и импульсные поме-

хи, которые распространяются от точки возникновения по судовым кабелям. Отмечается, что при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости важно иметь возможность оценить параметры импульсных помех, воздействующих на оборудование. Целью работы является определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета. Распределенные параметры кабелей предлагается определять расчетным путем с учетом влияния соседних проводников (кабелей), которое в первом приближении проявляется в увеличении распределенной емкости канала распространения и уменьшении волнового сопротивления. Измерять волновые сопротивления каналов распространения удобно методом импульсной рефлектометрии по величине ступеньки напряжения, отраженной от точки соединения штатного кабеля измерителя с исследуемой цепью. Экспериментальное исследование распространения импульсных напряжений заключается в подаче импульсов от имитаторов ИПП-4000 (IEC 61000-4-4), ИИП-1000 (IEC 61000-4-5) в выбранную цепь кабеля, а также осциллографирования напряжений в этой цепи и в соседних цепях, на ближнем и дальнем концах кабеля. В качестве расчетной модели распространения импульсных помех выбран метод распространяющихся волн. Результаты расчета и экспериментального исследования подтверждают, что достаточно учитывать только ближайшие к цепи распространения проводники, при этом погрешность расчета не превышает 10 %. Микросекундные импульсные помехи практически не затухают при распространении по кабелям длиной до 100 м. На конце кабеля возможно удвоение амплитуды помех. Для наносекундных импульсов наблюдается уменьшение амплитуды, увеличение длительности фронта и длительности импульсов. Для кабеля с большими сечениями проводников изменение фронта импульса меньше.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсная помеха, распространение, судовой кабель, волновое сопротивление, распределенный параметр.

Для цитирования:

Ахрестин М. А. Определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета / М. А. Ахрестин, А. А. Воршевский, П. А. Воршевский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-582-591.

Введение (Introduction)

Импульсные помехи возникают в электрической сети при коммутации потребителей электроэнергии, работе полупроводниковых преобразователей электроэнергии и другого электронного оборудования, при аварийных процессах. Длительность импульсов напряжения может составлять от десятков наносекунд до миллисекунд, а амплитуда (максимальное отклонение от рабочего напряжения) может превышать 1 кВ. Наносекундные импульсные помехи способны вызвать сбои цифровой техники, а микросекундные и миллисекундные импульсы могут разрушить электронные элементы. Импульсные помехи распространяются от точки возникновения по судовым силовым кабелям, вызывая наведенные напряжения в соседних информационных кабелях и воздействуя на электронное оборудование по цепям питания и передачи информации.

В процессе проведения работ по обеспечению электромагнитной совместимости важно иметь возможность оценить параметры импульсных помех, воздействующих на оборудование. Длительность фронта наносекундных помех может быть менее 5 нс, что предопределяет необходимость рассматривать кабели как длинные линии с распределенными параметрами. Общий подход к расчету описан в источнике [1]. Математические модели расчета распространения напряжений по многопроводным линиям в частотной и временной области даны в источнике [2]. Новый подход к расчету распространения электромагнитной волны по кабелям приведен в источнике [3], а расчет во временной области с учетом *скин-эффекта* — в источнике [4]. В статье [5] показана реализация SPICE модели на основе применения функции Грина. Расчеты в линиях с сосредоточенными элементами, новые модели и подходы в расчетах даны в источниках [6]–[8]. Принципиально новое представление о распространении импульсных высоких напряжений и токов по кабелю намечено в работе [9].

Для использования всех указанных ранее подходов к расчету импульсных напряжений в точке размещения электронного оборудования требуется знание волновых параметров судовых кабелей и особенности их прокладки. Волновые сопротивления силовых кабелей и кабелей

управления не регламентированы, так как эти кабели не предназначены для передачи сигналов с наносекундными фронтами и других высокочастотных сигналов. Параметры затухания импульсных напряжений в этих кабелях также неизвестны. Некоторые требуемые параметры кабелей могут быть рассчитаны на основе формул, приведенных в источниках [1], [10]–[12]. Однако погрешности расчета параметров применительно к судовым кабелям не определены.

Целью работы является экспериментальное определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения наносекундных импульсных помех и оценка погрешности существующих формул расчета этих параметров. Также важно проверить применимость методов расчета распространения импульсов напряжения для реальных судовых кабелей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Волновое сопротивление каждой пары жил кабеля и всех каналов распространения может быть определено методами импульсной рефлектометрии. Измеритель неоднородностей линии (рефлектометр) P5-12 содержит импульсный генератор с внутренним сопротивлением $R_r = 50$ Ом и штатный кабель длиной $l = 1,6$ м с волновым сопротивлением $Z = 50$ Ом. Встроенный осциллограф позволяет наблюдать напряжение в точке 0. Генератор создает ступеньку напряжения с фронтом менее 1 нс или импульс регулируемой длительности в начале кабеля прибора. Волна напряжения и тока распространяется по кабелю прибора до точки подключения исследуемого кабеля l , где отражается и возвращается через время t_3 в точку 0. Выходное сопротивление генератора $R_r = Z$ и отражения в точке 0 не возникает. Частично волна переходит на исследуемый кабель и распространяется по нему до точки 2, где отражается от нагрузки (рис. 1).

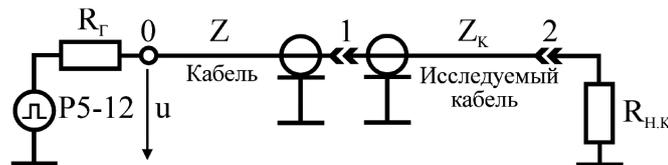


Рис. 1. Схема установки при исследовании волнового сопротивления кабеля

Первый скачок напряжения соответствует зондирующей ступеньке напряжения u (рис. 2), второй скачок a — волне, отраженной от точки соединения кабелей 1 на рис. 1, а скачок b , наблюдаемый через время $t_{3-к}$, соответствует возвращению волны, отраженной от нагрузки исследуемого кабеля и преломившейся в точке 1 с коэффициентом $2Z/(Z + Z_k)$.

Определив по осциллограмме (см. рис. 2) коэффициент отражения от точки 1:

$$\alpha_{отр} = \frac{u_{отр}}{u},$$

можно рассчитать волновое сопротивление исследуемого кабеля Z_k по формуле

$$Z_k = Z \frac{1 + \alpha_{отр}}{1 - \alpha_{отр}}. \quad (1)$$

Скорость распространения волны по исследуемому кабелю определяется по следующей формуле, если подставить в нее длину этого кабеля и время задержки $t_{3-к}$ из рис. 2:

$$v = \frac{2l}{t_{3-к}}. \quad (2)$$

Волновое сопротивление можно также определить по значению сопротивления $R_{н.к}$, при котором отсутствует отражение в точке 2 на рис. 1, т. е. по отсутствию ступеньки b на осциллограмме рис. 2. Измерения волнового сопротивления требуется повторить для каждой пары жил кабеля, для жилы относительно экрана (корпуса для неэкранированного кабеля), для группы жил относительно экрана (корпуса).

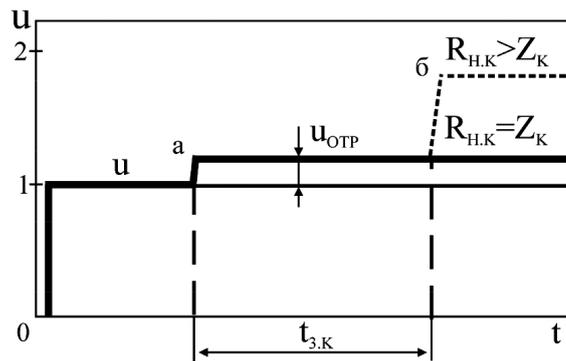


Рис. 2. Осциллограмма напряжения с исследуемым кабелем

Расчет распределенных параметров линии может быть выполнен по формулам, приведенным в источниках [1], [10]:

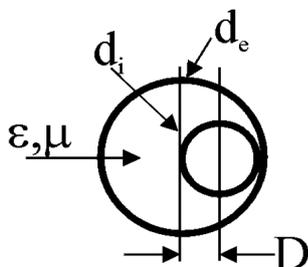
– для двух проводников диаметром d , оси которых разнесены на D , можно рассчитать коэффициент

$$K_w = \frac{1}{\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{D}{d} \right); \quad (3)$$

– для проводника диаметром d над проводящей поверхностью на высоте h

$$K_w = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{2h}{d} \right); \quad (4)$$

– для конфигурации проводника диаметром d_i внутри проводящего экрана диаметром d_e , смещенного на D (рис. 3) относительно центра, расчетная формула следующая:



$$K_w = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{d_e^2 + d_i^2 - 4D^2}{2d_e d_i} \right). \quad (5)$$

С помощью рассчитанного коэффициента K_w можно определить погонные параметры линии L , Гн/м, C , Ф/м, и волновое сопротивление Z , Ом:

$$L = K_w \mu_0 \mu_r;$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r / K_w; \quad (6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = K_w \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = K_w Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}, \quad (7)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377$ Ом — волновое сопротивление свободного пространства.

Взаимная индуктивность двух линий M_{12} , Гн/м, образованных проводами 1 и 2 на высоте h над проводящей поверхностью с расстоянием D между осями проводов определяется по формуле

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{D^2 + 4h^2}}{D} \right).$$

В многожильном кабеле на распространение импульсов вдоль линии, образованной парой проводов (жил), оказывают влияние остальные проводники кабеля и его экран. В первом приближении влияние заключается в увеличении емкости C между парой проводов и уменьшении волнового сопротивления Z этого канала распространения симметричных помех. Волновое сопротивление

ние каналов распространения для несимметричных помех по пути *провод – земля* или *провод – экран* также уменьшается из-за влияния рядом расположенных проводов. Учесть такое влияние можно упрощенно путем расчета емкостей между проводником и соседними проводами, экраном и увеличением емкости C проводника на эти добавочные емкости. Реальные кабели имеют конструкцию более сложную, чем описанные ранее случаи. Требуется оценка погрешности формул для расчета распределенных параметров кабелей и получение экспериментальных данных об этих параметрах.

Экспериментальное исследование распространения импульсных напряжений в кабельной трассе заключается в подаче импульсов в выбранную цепь кабеля от генератора и осциллографировании напряжений в этой цепи и в соседних цепях на ближнем и дальнем от генератора концах кабелей. При этом в качестве источников импульсных напряжений используются имитаторы импульсных помех наносекундной длительности по ГОСТу 30804.4.4 (ИПП-4000) и микросекундной длительности по ГОСТу 51314.4.5 (ИИП-1000). Это позволяет оценить распространения помех со стандартными параметрами. Имитатор пачек помех ИПП-4000 создает импульсные напряжения амплитудой до 4000 В длительностью 50 нс с фронтом 5 нс. Имитатор импульсных помех ИИП-1000 создает импульсные напряжения амплитудой до 1000 В длительностью 50 мкс с фронтом 1 мкс, позволяя оценить влияние увеличения длительности на изменение напряжения при распространении.

Необходимо проверить распространение как симметричных помех, подаваемых между жилами кабеля, так и несимметричных помех, подаваемых на жилу относительно экрана или земли (корпуса судна). В качестве расчетной модели распространения импульсных помех выбран *метод распространяющихся волн*. Для оценки максимально возможных значений амплитуды импульсных помех расчет выполняется при отсутствии потерь в диэлектрике и жилах кабеля. При этом амплитуда на дальнем конце будет определяться неоднородностями линии, а также соотношением сопротивления нагрузки и волнового сопротивления кабеля. Амплитуда помехи на ближнем конце определяется соотношением волнового сопротивления цепи кабеля и источника импульсных напряжений. Расчет распространения с учетом затухания выполняется на основе полной схемы замещения кабеля как длинной линии с потерями. Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль кабеля, уменьшается по величине от начала к концу линии. Уменьшение или затухание энергии происходит вследствие потерь на нагревание жил и поляризацию молекул изоляции. С ростом частоты потери увеличиваются. Коэффициент распространения

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)},$$

где α — коэффициент затухания; β — коэффициент фазы.

Сравнение расчетного затухания с результатами измерений позволяет уточнить параметры реальных кабелей: L , C , R , G .

Результаты (Results)

Расчет параметров для пары уединенных проводников, одиночного проводника над проводящей поверхностью или внутри цилиндрического экрана достаточно точно выполняется по формулам (3)–(7). Расчет влияния соседних проводников демонстрируется на рис. 4. Диаметр проводника $d = 0,002$ м, расстояние между проводами $D = 0,004$ м, высота проводников над листом или экраном $h = 0,0045$ м, диаметр оплетки $d_c = 0,018$ м.

Проведенные расчеты для различных условий и результаты расчета (см. рис. 4) показывают, что на практике при определении волнового сопротивления каналов распространения достаточно учитывать только ближайšie к линии проводники.

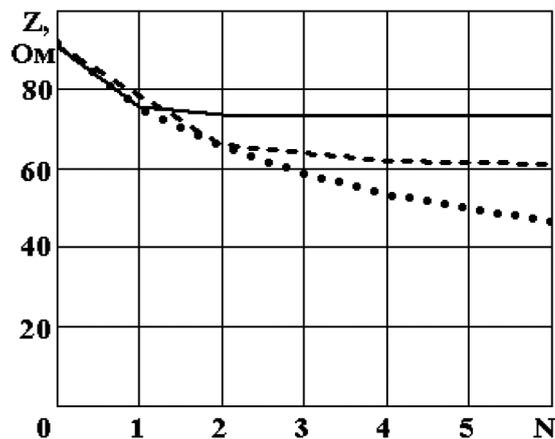


Рис. 4. Зависимость волнового сопротивления проводника над проводящей плоскостью от количества N параллельно проложенных с ним проводников
 Условные обозначения: ————— — N проводников с одной стороны на той же высоте;
 - - - - - — N проводников с двух сторон от основного проводника;
 ••••• — проводник в центре экрана кабеля при наличии вокруг него N соседних проводников

Результаты экспериментально измерения волновых сопротивлений Z_3 каналов распространения импульсов напряжения в кабеле КМПВЭ 7×2,5 и результаты расчета Z без учета влияния соседних проводников и экрана и с их учетом приведены в следующей таблице:

Волновое сопротивление каналов распространения в кабеле КМПВЭ 7×2,5

Цепь — канал распространения	Z , Ом, без учета соседних проводников	Z , Ом, с учетом соседних проводников	Z_3 , Ом, измеренное
Соседние жилы наружного слоя	108	74	78–80
Жилы наружного слоя через одну	160	86	93
Жилы наружного слоя противоположные	172	89	97
Жила центральная — жила наружного слоя	108	76	78
Жила наружного слоя — экран	82	60	54–56
Жила центральная — экран	92	54	61

Расчет волнового сопротивления с учетом соседних проводников и экрана имеет погрешность менее 10 %, что приемлемо для расчетов распространения импульсных помех по кабелям. Формулы (3)–(7) для одиночного провода над экраном или одиночной пары проводов не учитывают влияние соседних проводников, поэтому не пригодны для прямого расчета параметров распространения в многожильных кабелях и кабельных трассах. Для судового кабеля КНР расчетное значение волнового сопротивления уменьшается от 105 Ом для кабеля КНР с сечением 3×1 мм² до 30 Ом для кабеля КНР с сечением 3×240 мм².

Сравнение результатов расчета и измерения волнового сопротивления канала распространения *проводник – проводящий лист* (корпус судна) приведены на рис. 5. Подтверждается возможность расчета Z с учетом только соседних кабелей (проводников) в трассе.

Результаты расчета на основе модели кабеля с потерями и осциллографирования напряжения в начале кабеля КМПВЭ 7×2,5 длиной 50 м и на его разомкнутом конце при подаче между соседними жилами импульсов от имитатора пачек помех ИПП-4000 (выходное сопротивление 50 Ом) представлены на рис. 6.

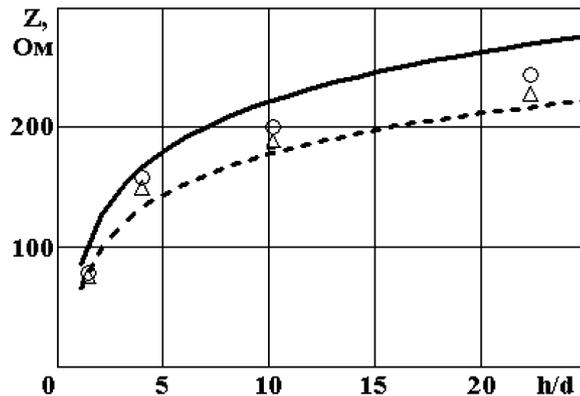


Рис. 5. Зависимость волнового сопротивления проводника Z над металлическим листом от отношения высоты прокладки h к ее диаметру d

Условные обозначения:

- расчет для одиночного проводника диаметром 6 мм;
- расчет с учетом влияния соседнего проводника;
- ○ ○ — измерения для проводника диаметром 6 мм;
- △ △ △ — измерения при наличии соседнего проводника.

Первый импульс на рис. 6, а создан ИПП-4000, второй — первым приходом отраженного от дальнего конца кабеля импульсом, третий — вторым приходом. Первый импульс на рис. 6, б обусловлен первым приходом импульса на конец кабеля. Амплитуда импульса достигает почти двойного значения амплитуды импульса, создаваемого ИПП-4000 в начале кабеля, из-за 100 %-го отражения при отсутствии нагрузки. Расчетная модель несколько занижает длительность импульса на конце кабеля, не позволяя рассчитать незначительный выброс положительной полярности перед вторым приходом импульса на конец кабеля.

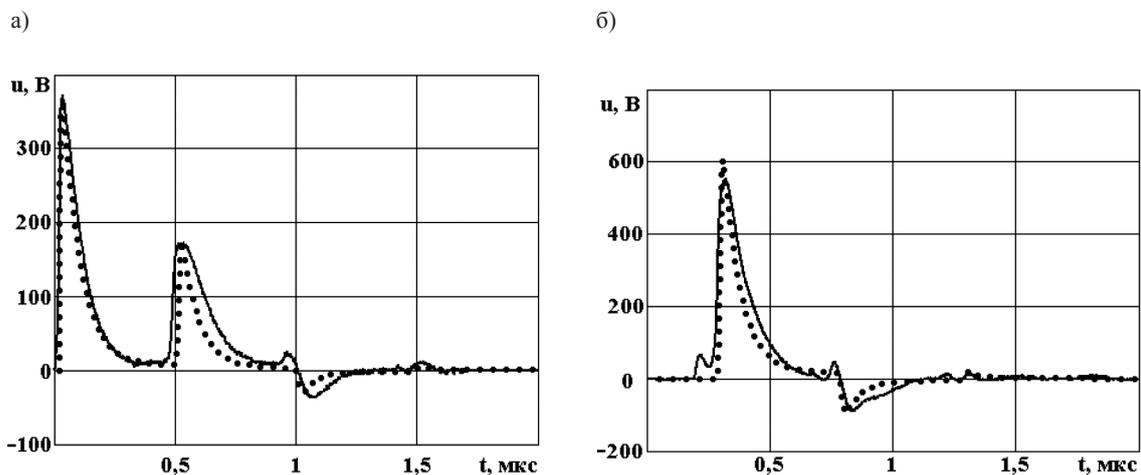


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (сплошные линии) в начале кабеля КМПВЭ 7×2,5 длиной 50 м (а) и в его конце (б) и результаты расчета (точки)

Результаты расчета при учете потерь и экспериментального исследования распространения наносекундных импульсов стандартной формы (с фронтом 5 нс и длительностью 50 нс) показывают увеличение длительности фронта и длительности импульсов. Для кабеля с малыми сечениями изменение фронта импульса больше, чем для кабеля с большими сечениями. При распространении по кабелю КНР сечением 3×1 мм² длиной 10 м амплитуда импульса уменьшается на 12 %, длительность фронта увеличивается на 24 %, длительность импульса увеличивается на 14 %. При длине кабеля 50 м амплитуда импульса уменьшается на 42 %, длительность фронта увеличивается

в 2,3 раза, а длительность импульса увеличивается на 64 %. При распространении того же импульса по кабелю КНР сечением 3×70 мм² и длиной 50 м амплитуда импульса уменьшается только на 19 %, длительность фронта увеличивается на 40 %, а длительность импульса увеличивается на 22 %. Микросекундные импульсные помехи (фронт 1 мкс, длительность 50 мкс) практически не изменяются по амплитуде при распространении по электротехническим кабелям длиной до 100 м, лишь длительность фронта импульса напряжения на дальнем конце растягивается до 0,1 мкс.

Обсуждение (Discussion)

Волновые параметры судовых электротехнических кабелей и кабелей управления не регламентированы и не приводятся в технических данных этих кабелей. Расчеты на основе формул, приведенных в [1], [10]–[12] для простейших случаев, дают недопустимые погрешности при расчете волновых параметров многожильных кабелей и для кабелей в трассе. Применение теории многопроводных линий [2] требует больших затрат по получению исходных данных и достаточно трудоемки в расчетах. Предлагаемый учет влияния только соседних проводников позволяет использовать формулы (3)–(7) [10], применяя их для расчета основного канала распространения и добавочных емкостей, обусловленных ближайшими проводниками.

Необъясненным пока остается появление небольшого положительного выброса перед третьим импульсом в начале кабеля и перед вторым на его конце, т. е. перед импульсом, претерпевшим отражение от источника импульсов. Модель не учитывает это явление, что, вероятно, можно объяснить влиянием индуктивности выходной цепи ИПП-4000.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Наносекундные импульсные помехи, возникающие при коммутациях в сети, способны вызвать сбои в работе любых технических средств, содержащих цифровые схемы. Импульсные помехи распространяются от точки возникновения по судовым кабелям и воздействуют на электронное оборудование по цепям питания и передачи информации.

2. Для оценки максимально возможных значений амплитуды импульсных помех расчет может быть проведен методом распространяющихся волн на основе модели кабелей при отсутствии потерь. Амплитуда импульсов определяется неоднородностями кабельной линии, соотношением сопротивления нагрузки и волнового сопротивления кабеля. На нагрузке с сопротивлением, значительно большим волнового сопротивления, возможно удвоение амплитуды. Более точная модель учитывает потери в кабеле.

3. Распределенные параметры кабелей, необходимые для расчета, отсутствуют в технической документации электротехнических кабелей. Предлагается рассчитывать эти параметры на основе приведенного подхода, учитывающего влияние соседних проводников (кабелей), или измерять волновые сопротивления каналов распространения описанным методом.

4. Приведенные значения волновых сопротивлений каналов распространения, количественные оценки изменения параметров помех полезны для прогнозирования воздействия импульсных помех на судовое оборудование. В частности, важен вывод, что микросекундные импульсные помехи практически не изменяются по амплитуде при распространении по электротехническим кабелям длиной до 100 м.

5. В дальнейшем предполагается составить таблицы с волновыми параметрами основных типов судовых кабелей и создать программный продукт, удобный для практических расчетов распространения импульсных помех в судовых кабельных трассах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воршевский А. А. Электромагнитная совместимость судовых технических средств / А. А. Воршевский, В. Е. Гальперин. — СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2010. — 317 с.

2. Paul C. R. *Analysis of multiconductor transmission lines* / C. R. Paul. — New York: Wiley, 1994. — 584 p.
3. Haase H. New propagation models for electromagnetic waves along uniform and nonuniform cables / H. Haase, T. Steinmetz, J. Nitsch // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. — 2004. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 345–352. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831829.
4. Barmada S. Wavelet-based time-domain solution of multiconductor transmission lines with skin and proximity effect / S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. — 2005. — Vol. 47. — Is. 4. — Pp. 774–780. DOI: 10.1109/TEMC.2005.857868.
5. De Lauretis M. A SPICE Realization of the Delay-Rational Green's-Function-Based Method for Multiconductor Transmission Lines / M. De Lauretis, G. Antonini, J. Ekman // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. — 2016. — Vol. 58. — Is. 4. — Pp. 1158–1168. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2546552.
6. Tan E. L. Non-uniform Time-Step FLOD-FDTD Method for Multiconductor Transmission Lines Including Lumped Elements / E. L. Tan, Z. Yang // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. — 2017. — Vol. 59. — Is. 6. — Pp. 1983–1992. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2691345.
7. De Lauretis M. A Delay-Rational Model of Lossy Multiconductor Transmission Lines With Frequency-Independent Per-Unit-Length Parameters / M. De Lauretis, G. Antonini, J. Ekman // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. — 2015. — Vol. 57. — Is. 5. — Pp. 1235–1245. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2423327.
8. Honarbakhsh B. Analysis of Multiconductor Transmission Lines Using the CN-FDTD Method / B. Honarbakhsh; S. Asadi // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. — 2016. — Vol. 59. — Is. 1. — Pp. 184–192. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2598067.
9. Сухоруков С. А. Особенности распространения импульсных перенапряжений по однопроводным линиям / С. А. Сухоруков // *Технологии ЭМС*. — 2011. — № 9 (38). — С. 52–77.
10. Tesche F. *EMC analysis methods and computational models* / F. Tesche, M. Ianoz, T. Karlson. — New York: Wiley, 1997. — 623 p.
11. Иоссель Ю. А. Расчет электрической емкости / Ю. А. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струинский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат (Ленингр. отд.), 1981. — 288 с.
12. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. — М.: Энергия, 1970. — 380 с.

REFERENCES

1. Vorshevskii, A. A., and V. E. Gal'perin. *Elekromagnitnaya sovместimost sudovyh tehnikeskikh sredstv*. SPb: SPbGMTU, 2010.
2. Paul, C. R. *Analysis of multiconductor transmission lines*. New York: Wiley, 1994.
3. Haase, Heiko, Torsten Steinmetz, and Jürgen Nitsch. “New propagation models for electromagnetic waves along uniform and nonuniform cables.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 46.3 (2004): 345–352. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831829.
4. Barmada, Sami, Antonino Musolino, and Marco Raugi. “Wavelet-based time-domain solution of multiconductor transmission lines with skin and proximity effect.” *IEEE transactions on electromagnetic compatibility* 47.4 (2005): 774–780. DOI: 10.1109/TEMC.2005.857868.
5. De Lauretis, Maria, Giulio Antonini, and Jonas Ekman. “A SPICE realization of the delay-rational Green's-function-based method for multiconductor transmission lines.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 58.4 (2016): 1158–1168. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2546552.
6. Tan, Eng Leong, and Zaifeng Yang. “Non-uniform Time-Step FLOD-FDTD Method for Multiconductor Transmission Lines Including Lumped Elements.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 59.6 (2017): 1983–1992. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2691345.
7. De Lauretis, Maria, Giulio Antonini, and Jonas Ekman. “A delay-rational model of lossy multiconductor transmission lines with frequency-independent per-unit-length parameters.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 57.5 (2015): 1235–1245. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2423327.
8. Honarbakhsh, Babak, and Shahrooz Asadi. “Analysis of multiconductor transmission lines using the CN-FDTD method.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 59.1 (2016): 184–192. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2598067.
9. Suhorukov, S.A. “Osobennosti rasprostraneniya impulsnyh perenapryazheniy po odnoprovodnym liniyam.” *Tehnologii EMC* 9(38) (2011): 52–77.

10. Tesche, F., M. Ianoz, and T. Karlson. *EMC analysis methods and computational models*. New York: Wiley, 1997.
11. Yossel, Y. A., E. S. Kochanov, and M. G. Struinskiy. *Raschet elektricheskoy emkosti*. L.: Energoizdat, 1981.
12. Kalantarov, P. L., and L. A. Ceytlin. *Raschet induktivnosti*. M.: Energiya, 1970.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахрестин Михаил Анатольевич —
инженер-конструктор
АО «Санкт-Петербургское морское бюро
машиностроения «Малахит»
196135, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Фрунзе, 18
e-mail: mishail05@mail.ru

Воршевский Александр Алексеевич —
доктор технических наук, доцент
Санкт-Петербургский Государственный морской
технический университет
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
e-mail: elemcom@smtu.ru

Воршевский Петр Александрович —
старший преподаватель
Санкт-Петербургский Государственный морской
технический университет
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
e-mail: kws@smtu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhrestin, Mikhail A. —
Engineer-constructor
St. Petersburg Maritime Bureau
of Mechanical Engineering «Malachite», JSC
18 Frunze Str., St. Petersburg, 196135,
Russian Federation
e-mail: mishail05@mail.ru

Vorshevsky, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: elemcom@smtu.ru

Vorshevsky, Petr A. —
Senior Lecturer
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: kws@smtu.ru

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2019 г.
Received: March 11, 2019.*

A DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF TURN-TO-TURN FAULTS AND BEARINGS DEFECTS OF INDUCTION ELECTRIC MOTORS

O. V. Sokolova¹, I. S. Sokolov²

¹ — Transbaikal Institute of Railway Transport – a branch of Irkutsk State Transport University, Chita, Russian Federation

² — Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

The problem of induction electric motors diagnostics is considered in the paper. Now many methods of induction motors diagnostics are developed. They are based on analyzing the vibrations of the electric motor elements, acoustic vibrations of the running electric motor, magnetic flux in the engine gap, secondary electromagnetic fields of the machine, temperature of the machine separate elements, work and condition of the mechanical knots, iron content in oil, isolation condition, electric and others machine parameters. Turn-to-turn faults in stator winding remain ones of the most widespread malfunctions. This malfunction is difficult to define at early stage. The electric motor is less exposed to damage at early detection of this malfunction. The researchers have proved that turn-to-turn faults in the stator winding have to be defined immediately even at small damage.

The engine can keep running but the fault will increase and cause heating in the damaged turns. Therefore the existence of turn-to-turn faults in the stator winding has to be timely defined. The developed diagnostics methods of turn-to-turn faults of induction engines, for example, Park's vector approach, a research of magnetic flux or spectral analysis of rotating engine allow us to find the defect already at a late stage of the fault development.

The device of induction engines diagnostics for defining the turn-to-turn faults at early stage of malfunctions is offered. The electric motor diagnostics can be test and functional. The device allows us to determine turn-to-turn faults by the number of engine speed and time of his running-out. The device has a number of advantages, such as expanded functionality, increased accuracy and reliability, electrical safety. The offered device allows us to protect the electric motor from negative impact of turn-to-turn faults and prolong the term of his trouble-free operation.

Keywords: induction electric motors, diagnostics, turn-to-turn faults, stator winding, quantity of turns, running-out time.

For citation:

Sokolova, Olga V., and Ivan S. Sokolov. "A device for diagnostics of turn-to-turn faults and bearings defects of induction electric motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 592–599. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-592-599.

УДК 621.313.333

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ И ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О. В. Соколова¹, И. С. Соколов²

¹ — Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «ИрГУПС», Чита, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Чита, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема диагностики асинхронных электродвигателей. Отмечается, что в настоящее время разработан ряд методов диагностики асинхронных двигателей, основанных на анализе вибраций элементов электродвигателя, акустических колебаний работающего электродвигателя, магнитного потока в зазоре двигателя, вторичных электромагнитных полей машины, температуры отдельных элементов машины, работы и состояния механических узлов, состояния изоляции, электрических и других параметров машины, но при этом подчеркивается, что межвитковые замыкания в обмотке статора остаются одной из самых распространенных и трудно выявляемых на ранней стадии неисправностей.

Исследователями доказано, что даже при небольшом дефекте межвитковые замыкания в обмотке статора нужно незамедлительно определять, так как двигатель может продолжать работать, но дефект будет увеличиваться и вызывать нагревание в этих витках. Разработанные методы диагностики межвитковых замыканий асинхронных двигателей, например, векторный подход Парка, исследование магнитного потока или спектральный анализ вращающегося двигателя, позволяют обнаружить дефект уже на поздней стадии развития.

Предложено устройство диагностики асинхронных двигателей для определения межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей на ранней стадии неисправностей, которое позволяет определять межвитковые замыкания по количеству оборотов двигателя и дефекты подшипников по его времени выбега. Преимуществами устройства являются: расширение функциональных возможностей, включающее косвенное определение наличия межвитковых замыканий обмоток статора, дефектов межвитковых замыканий и повышение электробезопасности за счет развязки сигналов блока питания с сетью. Данное устройство позволяет своевременно определить наличие межвитковых замыканий статора и дефектов подшипников и в результате защитить электродвигатель от их негативного воздействия, а также продлить срок его безаварийной работы.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, диагностика, межвитковые замыкания, обмотка статора, количество оборотов, время выбега.

Для цитирования:

Соколова О. В. Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников асинхронных электродвигателей / О. В. Соколова, И. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 592–599. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-592-599.

Введение (Introduction)

Широкое применение асинхронных трехфазных электродвигателей на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта связано с эксплуатацией электродвигателей в условиях повышенной влажности. В таких условиях многие неисправности электродвигателей быстро прогрессируют и выводят из строя электродвигатели даже с небольшим сроком эксплуатации. Своевременное и точное определение неисправности сокращает сроки ремонта и уменьшает непредвиденные расходы. Качественная и быстрая диагностика состояния электродвигателей также нужна на подготовительном этапе ремонта электрического оборудования судов для объективного определения вида и объема предстоящих работ.

В настоящее время разработан ряд методов диагностики асинхронных двигателей, основанных на анализе вибрации элементов электродвигателя, акустических колебаний работающего электродвигателя, магнитного потока в зазоре двигателя, вторичных электромагнитных полей машины, температуры отдельных элементов машины, работы и состояния механических узлов, содержания железа в масле, состояния изоляции, электрических параметров машины и др. [1]. Анализ существующих методов технической диагностики электродвигателей показывает, что существуют два направления в развитии. К первому направлению относятся методы, связанные с прерыванием технологического процесса или заменой электродвигателя, осуществляемые при проведении профилактических испытаний и ремонтов и позволяющие выявлять практически все возможные виды дефектов. Ко второму направлению относятся методы диагностики работающих электродвигателей при непрерывном технологическом процессе. Изучение этого вопроса показало, что несмотря на все достоинства методов диагностирования неисправностей электродвигателя, в каждом из них существуют недостатки, в связи чем открытым остается вопрос о разработке системы диагностики [2]–[4].

Среди существующих методов наиболее широко используется *метод вибродиагностики*, основанный на измерении и анализе спектральных характеристик вибрации. По информативности ему не уступает метод, основанный на анализе спектральных характеристик фазных токов, однако диагностические приборы не имеют широкого распространения [5]. Это же касается и разработанной автоматизированной системы контроля технического состояния трехфазных асинхронных электродвигателей, и многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей [6], [7].

Функциональная диагностика электродвигателя направлена на анализ состояния электродвигателя. Наиболее часто встречающимися и трудно выявляемыми на ранней стадии неисправностями электродвигателей являются межвитковые замыкания в обмотках статора. При такой неисправности электродвигатель может продолжать работать, но его состояние постепенно ухудшается, что неизбежно приведет к дефектам, требующим его перемотки или замены. Поэтому диагностика межвитковых замыканий в обмотках статора очень важна, особенно на ранних стадиях развития. Группой авторов в Забайкальском государственном университете разработаны способы диагностики межвитковых замыканий асинхронных электродвигателей [8], [9]. Учитывая широкое распространение указанной неисправности и важность ее диагностики, считаем необходимым продолжить проработку этого вопроса.

Целью работы является создание устройства диагностики межвитковых замыканий обмоток статора асинхронного электродвигателя для быстрого определения неисправности. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить наиболее часто возникающие неисправности асинхронных электродвигателей;
- изучить методы их диагностики;
- разработать устройство функциональной диагностики наиболее часто возникающих неисправностей асинхронных электродвигателей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования характера дефектов электродвигателей переменного тока показали, что большую часть дефектов составляют дефекты элементов подшипников (около 40 %) и элементов статора (около 38 %) [10], при этом дефекты межвитковых замыканий обмоток статора составляют около 15 % от общего числа неисправностей.

Дефекты элементов подшипников относятся к механическим, и их наличие определяется методами вибродиагностики, тепловизионного контроля и др. Межвитковые замыкания обмоток статора относятся к электрическим дефектам асинхронных двигателей и определяются с помощью векторного подхода Парка, исследования магнитного потока, спектрального анализа вращающегося двигателя и др. Эти методы позволяют обнаружить дефекты электродвигателя на поздней стадии развития. При разработке устройства основными характеристиками, позволяющими определить наличие наиболее часто встречающихся дефектов, были выбраны время выбега электродвигателя и частота его вращения, определяемая с помощью тахогенератора. При наличии указанных ранее дефектов количество оборотов в минуту не соответствует номинальной характеристике двигателя, а время выбега позволяет определить наличие дефектов подшипников.

Результаты (Results)

Разработанное устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя используется для одновременного определения дефектов, связанных с межвитковыми замыканиями и дефектов подшипников как наиболее часто встречающихся неисправностей. Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя показано в виде полной принципиальной развернутой схемы (рис. 1). Функциональная схема устройства содержит:

- блок датчика;
- пуско-остановочный блок;
- блок питания;
- блок совместимости;
- блок измерения времени выбега;
- блок измерения количества оборотов двигателя.

Блок датчика *I* предназначен для формирования сигнала при вращении двигателя и его остановки. Блок состоит из тахогенератора *BR* и переключателя *BK* для изменения полярности

вырабатываемого напряжения в зависимости от направления вращения испытываемого электродвигателя *M*.

Пуско-остановочный блок 2 предназначен для согласования силовых электрических сигналов с управлением электродвигателя *M* для согласования с малоточной электроникой 4 этого блока, а также для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и четкости управляющего сигнала. Блок состоит из неполярного конденсатора *C1*, герконового реле *R1*, выпрямительного моста *VD1*, полярного конденсатора *C2*, стабилитрона *V1*, диода *V2* и герконового реле *P1*. Неполярный конденсатор *C1* является балластным и предназначен для снижения действующего напряжения до величины, необходимой для работы герконового реле *R1*, которое ограничивает величину тока. Полярный конденсатор *C2* сглаживает пульсации напряжений, прошедших через выпрямительный мост *VD1*. *V1* стабилизирует напряжения до величины, приемлемой для питания герконового реле *P1*, обеспечивающего своевременное включение и выключение таймера блока измерения времени выбега 5.

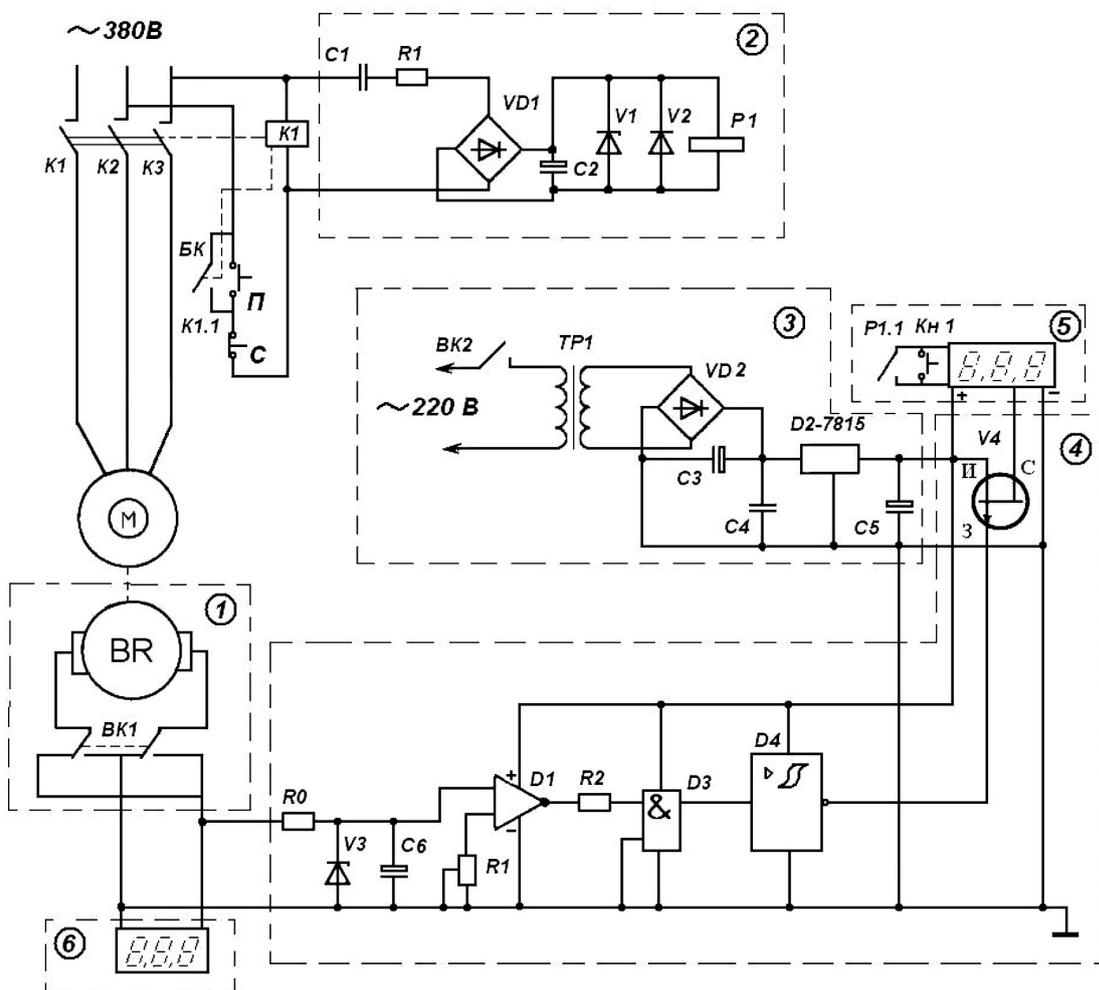


Рис. 1. Полная принципиальная развернутая схема рассматриваемого устройства

Блок питания 3 обеспечивает питание блока совместимости 4, блока измерения времени выбега 5 и блока измерения количества оборотов двигателя 6. Данный блок состоит из понижающего трансформатора *TP1*, выпрямительного моста *VD2*, полярного конденсатора *C3* и *C5*, неполярного конденсатора *C4* и стабилизатора напряжения *D2-7815*. Блок питания 3 подключен к сети напряжением 220 В. Проходя через понижающий трансформатор *TP1*, входное напряжение снижается до 20 В, затем выпрямляется с помощью *VD2*, сглаживается конденсаторами *C3*, *C4*,

регулируется с помощью стабилизатора напряжения D2-7815 и фильтруется полярным конденсатором C5, таким образом на выходе получаем напряжение 15 В, необходимое для работы трех перечисленных блоков.

Блок совместимости 4 обеспечивает совместимость датчика с электроникой и формирует сигнал включения и выключения таймера в нужное время. Он состоит из резисторов R0, R1, R2, стабилитрона V3, полярного конденсатора C6, компаратора D1, полевого транзистора V4, логического элемента D3 и триггера Шмитта D4.

Ток стабилитрона V3 ограничивается резистором R0. Пульсация напряжения сглаживается полярным конденсатором C6. Регулировка чувствительности компаратора D1 обеспечивается резистором R1, резистор R2 является согласующим сопротивлением аналогового сигнала компаратора D1 с логическим элементом D3 и триггером Шмитта D4. При включенном электродвигателе M полевой транзистор V4 закрыт, и таймер блока измерения времени выбега 5 не производит отсчет. После отключения двигателя M полевой транзистор V4 открывается и происходит отсчет времени выбега электродвигателя M до его полной остановки.

Блок измерения времени выбега 5 предназначен для визуального определения времени выбега электродвигателя с точностью до 0,1 с. Он состоит из таймера, контактов P1.1 и кнопки Kn1. Замер времени начинается с момента отключения электродвигателя до его полной остановки. В течение небольшого промежутка времени напряжение уменьшается до нуля, что соответствует полной остановке двигателя (рис. 2).

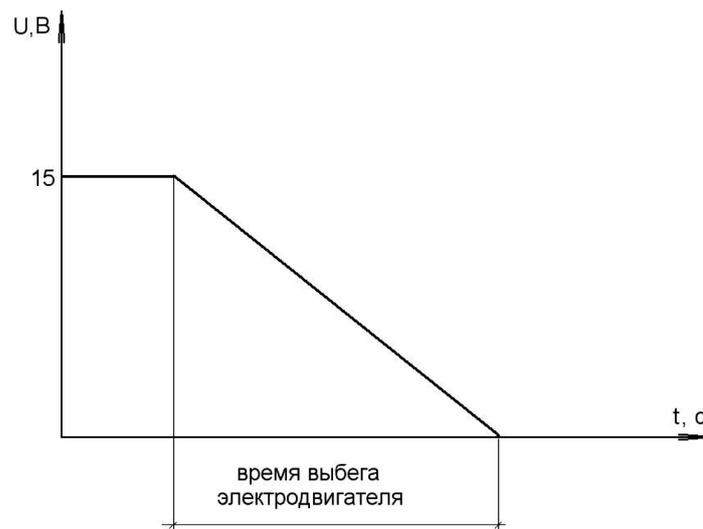


Рис. 2. График функции изменения величины напряжения от времени

Блок измерения количества оборотов двигателя 6 предназначен для определения количества оборотов двигателя. Он состоит из цифрового тахометра, который непосредственно связан с тахогенератором BR для определения количества оборотов двигателя.

Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя работает следующим образом. При нажатии кнопки ПУСК запускается испытуемый электродвигатель M, срабатывает P1, и контакты замыкаются, происходит обнуление таймера до отключения двигателя. Триггер Шмитта воспринимает входной сигнал. На выходе Триггера Шмитта сигнал I поступает на затвор, открывая его, при этом происходит разрешение счета, но так как контакты реле P1.1 замкнуты, счета не происходит. После включения двигателя M1 он должен набрать максимальное число оборотов, которое контролируется по тахометру, после достижения максимальных оборотов электродвигатель M1 отключается кнопкой СТОП — С, пускатель K1 обесточивается и отключается реле P1, контакты P1.1 размыкаются, раз-

решая работу таймера, он начинает подсчитывать время свободного выбега. После остановки электродвигателя *M1* сигнал с тахогенератора *BR* пропадает. Триггер Шмитта *D4* с помощью транзистора *V4* открывает напряжение. Происходит запрет счета таймера, показания таймера можно считывать.

Обсуждение (Discussion)

Многочисленные исследования характера дефектов двигателей переменного тока позволили получить следующие статистические данные [10]:

- дефекты элементов статора — 38 %;
- дефекты элементов ротора — 10 %;
- дефекты элементов подшипников — 40 %;
- другие дефекты — 12 %.

Эти статистические данные у разных авторов имеют различные значения, но все исследователи придерживаются одного мнения о том, что наиболее часто встречаются дефекты подшипников и элементов статора.

Основные требования, предъявляемые к устройствам и способам диагностики:

- достоверность;
- функциональность;
- простота;
- при необходимости, дистанционность;
- возможность аналитической обработки результатов;
- возможность не прерывания производственного процесса.

Предлагаемое устройство разработано в целях своевременного обнаружения дефектов асинхронных электродвигателей, связанных с межвитковыми замыканиями обмоток статора и дефектами элементов подшипников. Диагностика с помощью предлагаемого устройства позволяет избежать дальнейшего развития негативных процессов, уменьшить время восстановления электродвигателя, сократить затраты на ремонт, сократить простой оборудования, повысить эффективность работы двигателя. Диагностика с помощью предложенного устройства отличается электробезопасностью, функциональностью и простотой, при этом охватывает наиболее часто встречающиеся дефекты. Устройство не отвечает требованиям дистанционности и для проведения диагностики имеется необходимость выключения двигателя на очень непродолжительный промежуток времени, составляющий всего несколько минут.

Заключение (Conclusion)

Как доказала мировая практика, внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования во всех отраслях производства. Предложенное устройство диагностики асинхронных электродвигателей может применяться на судах и во всех хозяйствах водного транспорта, так как оно позволяет определять наличие неисправности в подшипниках по времени выбега и наличию межвитковых замыканий обмоток статора без предварительной разборки электродвигателя и ускоряет определение перечисленных неисправностей.

Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов подшипников электродвигателя предназначено для комплексной диагностики электродвигателя и применяется для одновременного определения дефектов различных частей двигателя. Преимуществами устройства являются:

- расширенные функциональные возможности, включающие косвенное определение наличия межвитковых замыканий обмоток статора и дефектов подшипников;
- повышенная электробезопасность за счет развязки сигналов блока питания с сетью, что является немаловажным фактором при применении устройства в условиях повышенной влажности на судах и в хозяйствах водного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидельников Л. Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л. Г. Сидельников, Д. О. Афанасьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2013. — Т. 12. — № 7. — С. 127–131.
2. Бахарев А. В. Анализ методик оценки технического состояния электродвигателя / А. В. Бахарев, А. Д. Умурзакова // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2017. — С. 402.
3. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines / F. Babaa, A. Khezzar, M. el kamel Oumaamar // *Frontiers in Energy*. — 2013. — Vol. 7. — Is. 3. — Pp. 271–278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6
4. Mazzoletti M. A. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM / M. A. Mazzoletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, D. R. Espinoza-Trejo // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2017. — Vol. 64. — Is. 9. — Pp. 7218–7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973
5. Жарков В. В. Метод диагностирования асинхронных электродвигателей и устройство для его реализации / В. В. Жарков, В. И. Смирнов, Д. В. Чернов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2004. — № 3. — С. 39–44.
6. Марданов Р. Р. Автоматизированная система контроля технического состояния асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук; спец: 05.11.13 / Р. Р. Марданов. — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2013. — 149 с.
7. Пустахайлов С. К. Разработка многоканальной системы мониторинга асинхронных электродвигателей электростанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. К. Пустахайлов. — Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технический университет, 2006. — 179 с.
8. Пат. 2529596 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И. Ф. Суворов, Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Д. В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110594; заявл. 11.03.2013; опубл. 27.09.2014; Бюл. № 27. — 8 с.
9. Пат. 2537518 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/06. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя / И. Ф. Суворов, Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Д. В. Коряков; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет». — № 2013110600; заявл. 11.03.2013; опубл. 10.01.2015; Бюл. № 1. — 6 с.
10. Петухов В. С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. С. Петухов, В. А. Соколов // *Новости Электротехники*. — 2005. — № 1 (31). — С. 23–28.

REFERENCES

1. Sidel'nikov, L. G., and D. O. Afanas'ev. "Control methods review of induction motors technical state during operation." *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering* 12.7 (2013): 127–137.
2. Bakharev, A. V., and A. D. Umurzakova. "Analiz metodik otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrodvigatelya." *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: materia-ly III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2017. 402.
3. Babaa, Fatima, Abdelmalek Khezzar, and Mohamed el kamel Oumaamar. "Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines." *Frontiers in Energy* 7.3 (2013): 271–278. DOI: 10.1007/s11708-013-0258-6
4. Mazzoletti, Manuel A., Guillermo R. Bossio, Cristian H. De Angelo, and Diego R. Espinoza-Trejo. "A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.9 (2017): 7218–7228. DOI: 10.1109/TIE.2017.2688973
5. Zharkov, V.V., V.I. Smirnov, and D.V. Chernov. "Metod diagnostirovaniya asinkhronnykh elektrodvigatelye i ustroystvo dlya ego realizatsii." *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3 (2004): 39–44.
6. Mardanov, R.R. Avtomatizirovannaya sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelye s korotkozamknutym rotorom. PhD diss. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2013.

7. Pustakhailov, S.K. Razrabotka mnogokanal'noi sistemy monitoringa asinkhronnykh elektrodvigatelei elektrostantsii. PhD diss. Stavropol': Severo-Kavkazskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006.

8. Suvorov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, and D.V. Koryakov. RU 2 529 596, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2014.

9. Suvorov, I.F., R.V. Gorbunov, G.A. Palkin, D.V. Koryakov. RU 2 537 518, IPC G 01 R 31/06. Sposob diagnostiki mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2015.

10. Petukhov, V.S., and V.A. Sokolov. "Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka." *Novosti Elektrotehniki* 1(31) (2005): 23–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколова Ольга Владимировна —
кандидат технических наук, доцент
Забайкальский институт железнодорожного
транспорта – филиал ФГБОУ ВО «ИрГУПС»
672040, Российская Федерация, г. Чита,
ул. Магистральная, 11
e-mail: sokolova.olga1963@mail.ru

Соколов Иван Сергеевич —
ассистент
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный
университет»
672039, Российская Федерация, г. Чита,
ул. Александрo-Заводская, 30
e-mail: ivan.sokolov1992@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolova, Olga V. —
PhD, associate professor
Transbaikal Institute of Railway Transport –
branch of Irkutsk State Transport University
11 Magistral'naya Str., Chita, 672040,
Russian Federation
e-mail: sokolova.olga1963@mail.ru

Sokolov, Ivan S. —
Assistant
Transbaikal State University
30 Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039,
Russian Federation
e-mail: ivan.sokolov1992@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2019 г.
Received: March 11, 2019.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 11. № 3

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 24,25. Тираж 500 экз. Заказ № 343/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7