

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

# **ВЕСТНИК**

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

**Выпуск 3 (37)**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2016**

**Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.** — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 3 (37). — 242 с.

ISSN 2309-5180

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

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

Статьи публикуются на русском и английском языках.

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

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

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

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

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

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

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



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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ ..... 7

Майоров Н. Н., Кириченко А. В., Фетисов В. А. Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования ..... 7

Гроховский В. А., Меньшиков В. И., Азарков С. А. Алгоритм расчета параметров зоны навигационной безопасности с учетом текущей и априорной информации ..... 16

Дерябин В. В. Алгоритмы обучения нейросетевой системы счисления пути судна ..... 23

Маликова Т. Е., Янченко А. А. Применение технологии предварительного информирования таможенных органов при морских внеплановых грузоперевозках ..... 33

Решняк В. И., Витязева О. В. Исследование возможности утилизации пластиковых отходов, образующихся на объектах водного транспорта ..... 45

Русинов И. А., Гаврилова И. А., Нелогов А. Г. Вопрос регулирования линейного судоходства на основе анализа положений Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций ..... 53

Бурмака И. А., Калинин Г. Е., Кулаков М. А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения ..... 64

### ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ ..... 71

Колосов М. А., Коношенков А. А. Разработка конструкции водосброса для судоходных гидроузлов ..... 71

Моргунов К. П. Исследование изменения характеристик грунта в основании и засыпке судоходных шлюзов в процессе строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений ..... 78

Томсон П. В. Разработка алгоритма вычисления грубых ошибок измерений ..... 88

### СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ ..... 94

Павлов А. В., Чистов В. Б. Расстановка стальных тумб при ремонте корпуса судна ..... 94

Коростылёв Л. И., Литвиненко Д. Ю. Анализ и классификация методов оценки усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна ..... 104

Антоненко С. В. Расчёт боковых клеток при смещении судна в доке ..... 119

Кулеш В. А., Немкин Д. В. Разработка норм износа для плавучего дока с учетом эксплуатационных ограничений ..... 128

Чертовской В. Д. О перспективных методах планирования выпуска продукции при импортозамещении ..... 136

### СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ..... 143

Безюков О. К., Ерофеев В. Л., Пряхин А. С. Использование хладопотенциала сжиженного природного газа для снижения выбросов диоксида углерода теплоэнергетическими установками, работающими на сжиженном природном газе ..... 143

выпуск **3(37)**  
**2016**

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

##### Главный редактор

**С. О. Барышников,**

д.т.н., профессор

rector@gumrf.ru

##### Зам. гл. редактора

**Т. А. Пантина,** д.э.н., проф.

PantinaTA@gumrf.ru

##### С. Гуцма —

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

##### Г. В. Егоров —

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

##### Ф. В. Кармазинов —

ген. директор ГУП  
«Водоканал СПб», д.т.н., проф.

##### Р. Качиньски —

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

##### А. И. Пошивай —

заместитель руководителя  
Федерального агентства  
морского и речного транспорта

##### А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., член-  
корреспондент РАН

##### Р. М. Юсупов —

директор Санкт-Петербургского  
института информатики и  
автоматизации РАН, д.т.н.,  
проф., член-корреспондент РАН

##### РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены  
редколлегии:**

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

- Гаврилов В. В., Мащенко В. Ю.* Принципы построения иерархического  
комплекса систем диагностирования судового дизеля ..... 155  
*Иванченко А. А., Щенников И. А., Иванченко А. А.* Проблемы и опыт  
математического моделирования экологических и эксплуатационных  
показателей судового высокооборотного дизеля М482 ..... 166

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ..... 174**

- Сан Ю, Сеньков А. П.* Сравнение массогабаритных показателей вентильных  
электродвигателей с распределенной и зубцовой обмотками статора ..... 174  
*Каракаев А. Б., Луканин А. В.* Исследование основных зависимостей между  
показателями надежности и показателем глубины контроля судового  
электрооборудования ..... 180  
*Сакович И. А., Черевко А. И., Лимонникова Е. В.* Математическое моделирование  
управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов  
с вращающимся магнитным полем ..... 192

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
НА ТРАНСПОРТЕ ..... 201**

- Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В.* Алгоритмизация и синтез  
систем управления судовыми динамическими объектами средствами  
математического программирования ..... 201  
*Дыда А. А., Осокина Е. Б., Дыда П. А.* Оптимизация параметров робастного  
регулятора системы управления курсом судна ..... 211  
*Сметух Н. П.* Разработка адаптивной компьютеризированной системы обучения  
специалистов водного транспорта в процессе промысла ..... 217  
*Марлей В. Е., Федорина Е. С.* Анализ и обработка потоков данных  
в информационной системе порта ..... 227  
*Смышляева Е. О., Ковальногова Н. М., Соколов С. С.* Исследование  
международной рейтинговой системы Webometrics как средства содействия  
повышению научной активности и присутствия университетов в интернете ..... 233

|                                                                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION.....</b>                                                                                                                                                  | <b>7</b>   |
| <i>Majorov N. N., Kirichenko A. V., Fetisov V. A.</i> Research operational management container terminal based on the transport model and simulation .....                                            | 7          |
| <i>Grokhovsky V. A., Menshikov V. I., Agarkov S. A.</i> The algorithm for calculating the navigation security zone parameters with the account of current and a priori information .....              | 16         |
| <i>Deryabin V. V.</i> Training algorithms of neural network based vessel's dead reckoning system .....                                                                                                | 23         |
| <i>Malikova T. E., Yanchenko A. A.</i> The implementation of preliminary informing technology of customs authorities in sea spot cargo transportation .....                                           | 33         |
| <i>Reshnyak V. I., Vitjazeva O. V.</i> Research the possibility of recycling plastics waste generated at the objects of water transport .....                                                         | 45         |
| <i>Rusinov I. A., Gavrilova I. A., Nelogov A. G.</i> Regarding the control of liner shipping based on the analysis of the UN convention principles of the Code of Conduct for Liner Conferences ..... | 53         |
| <i>Burmaka I. A., Kalinichenko G. E., Kulakov M. A.</i> Management by pair of vessels in situation of dangerous rapprochement .....                                                                   | 64         |
| <b>WATERWAYS AND HYDROGRAPHY .....</b>                                                                                                                                                                | <b>71</b>  |
| <i>Kolosov M. A., Konoshenkov A. A.</i> Engineering spillway construction for navigable hydrosystem .....                                                                                             | 71         |
| <i>Morgunov K. P.</i> Research of change of descriptions of soil in foundation and backfill of shipping lock in the process of building and exploitation of hydraulic construction .....              | 78         |
| <i>Thomson P. V.</i> Design of algorithm of the computation of gross errors of measurements .....                                                                                                     | 88         |
| <b>SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR .....</b>                                                                                                                                                             | <b>94</b>  |
| <i>Pavlov A. V., Chistov V. B.</i> Arrangement of shipbuilding bollards during ship hull repair .....                                                                                                 | 94         |
| <i>Korostylev L. I., Litvinenko D. Yu.</i> Analysis and classification of methods for determining fatigue strength of thin-walled ship structures .....                                               | 104        |
| <i>Antonenko S. V.</i> Calculation of the side blocks in cases of vessel's displacement in dry dock .....                                                                                             | 119        |
| <i>Kulesh V. A., Nemkin D. V.</i> Development of deterioration standards for floating dock with operational restrictions .....                                                                        | 128        |
| <i>Chertovskoj V. D.</i> About perspective methods of product release planning at import replacement condition .....                                                                                  | 136        |
| <b>SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES .....</b>                                                                                                                                                   | <b>143</b> |
| <i>Bezyukov O. K., Erofeyev V. L., Pryakhin A. S.</i> Uses of a hladopotensial of the liquefied natural gas for decrease in emissions of carbon dioxide heat power installations .....                | 143        |
| <i>Gavrilov V. V., Mashchenko V. Yu.</i> Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine .....                                                                          | 155        |

edition **3(37)**  
**2016**

**EDITOR-IN-CHIEF**

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

**Deputy Editor-in-Chief**

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

**S. Gutsma** —  
Rector of the Maritime Academy  
(g.Schetsin, Poland), doctor of  
technical Sciences, Prof.

**G. V. Yegorov** —  
General Director of "Marine  
Engineering Bureau - St.  
Petersburg", doctor of technical  
Sciences, Prof.

**F. V. Karmazinov** —  
General Director "Vodokanal  
of St. Petersburg", doctor of  
technical Sciences, Prof.

**R. Kachin'ski** —  
Vice-Rector for Development  
and Cooperation of the Technical  
University (Bialystok, Poland),  
doctor of technical Sciences, Prof.

**A. I. Poshivay** —  
Deputy Head of the Federal  
Agency of Sea and River  
Transport

**A. Ye. Sazonov** —  
doctor of technical Sciences,  
Prof., corresponding member of  
the Russian Academy of Sciences

**R. M. Yusupov** —  
director of "St. Petersburg  
Institute for Informatics and  
Automation of RAS", doctor  
of technical Sciences, Prof.,  
corresponding member of the  
Russian Academy of Sciences

**EDITORIAL STAFF:**  
E-mail: journal@gumrf.ru  
http://journal.gumrf.ru

## Editorial Collegium:

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

*Ivanchenko A. A., Shchennikov I. A., Ivanchenko A. A.* Problems and experience of mathematical modeling NOx emissions and operating characteristics of high-speed diesel engine M482 ..... 166

## ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS ..... 174

*Thsan Yu, Sen'kov A. P.* Comparison of weight and overall dimensions of BLDC motor with distributed and concentrated stator windings ..... 174

*Karakaev A. B., Lukanin A. V.* Investigation main dependences between indicators of reliability and indicator of ship electroequipment control depth ..... 180

*Sakovich I. A., Cherevko A. I., Limonnikova E. V.* Mathematical modeling of controlled rectifiers based on rotating magnetic field transformers ..... 192

## INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT ..... 201

*Saharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V.* Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming ..... 201

*Dyda A. A., Osokina E. B., Dyda P. A.* Parameter optimization of robust regulator for ship control system ..... 211

*Smetuh N. P.* Development of adaptive computerized training system of specialists of water transport in the process of fishing ..... 217

*Marley V. E., Fedorina E. S.* Analysis and processing of data flows in information system of port ..... 227

*Smyshliaeva E. O., Kovalnogova N. M., Sokolov S. S.* Research of Webometrics ranking of world universities as a way to promote university's scientific activity and web-presence ..... 233

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 646.078

Н. Н. Майоров,  
А. В. Кириченко,  
В. А. Фетисов

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В статье на основе изучения современных логистических процессов контейнерного терминала, характеризующихся динамической изменчивостью, необходимостью учета разнородных параметров, а также учетом критериев безопасности, отмечается, что для транспортного узла необходимо определение большого числа таких параметров, как пропускная способность, определенное количество обслуживающей техники и др., а также для повышения безопасности транспортный узел необходимо исследовать на уязвимости. Для этого нужно иметь инструментарий, который позволит решить данные вопросы. Предлагается для решения задач разрабатывать специализированные транспортные модели с использованием имитационного моделирования и данных от систем видеофиксации. В статье рассмотрено применение системного подхода к описанию транспортного узла, рассматривается математическая методика для определения состояний контейнерного терминала, приводится структурно-адекватная модель терминала и обзор методик систем фиксации событий. В работе рассмотрен фрагмент транспортной модели контейнерного терминала и сделан вывод как о достоинствах применения таких моделей, так и сложностях при их разработке.*

*Ключевые слова:* транспортный узел, имитационное моделирование, вероятностные характеристики, грузопоток, контейнерный терминал, транспортная модель.

### Введение

Для качественной и бесперебойной работы транспортного узла необходима слаженная работа множества подразделений и служб, которые в случае возникновения любых внештатных ситуаций должны быстро принимать меры по их ликвидации. При работе любого транспортного узла возникают задачи прогнозирования загруженности, анализа слабых мест, задачи организации непрерывного мониторинга с целью повышения безопасности. В настоящее время данные задачи на практике, как правило, решаются по отдельности, что может привести к ситуациям, когда лицо, принимающее решение (ЛПР), может сделать неправильный выбор, основываясь на теоретическом прогнозе грузопотока или на некотором наборе статистических данных. Современные логистические процессы характеризуются динамической изменчивостью, в том числе под воздействием мировой экономической ситуации, что обуславливает необходимость принятия оперативных решений в течение небольшого промежутка времени работы транспортного узла, тем самым принять решение в условиях неопределенности. В данном аспекте сегодня для лиц, принимающих оперативные решения по работе транспортного узла, требуется использование специализированных логистических автоматизированных информационных систем на основе имитационного моделирования, решающих задачи прогнозирования в зависимости от потока входящих объектов и использующих мониторинг перемещения объектов внутри транспортного узла в режиме реального времени.

### Методы исследований операций в транспортных узлах и терминалах

Под транспортным узлом понимается совокупность материальных и людских ресурсов, организованных в системе взаимосвязанных технологических процессов в целях обеспечения и координации перевозок. Транспортный узел, как правило, организуется в местах стыковки транспорта. Понятие *транспортный узел* включает рассмотрение особенностей процесса перевозки, технических устройств и средств контроля и управления. В работах [1] – [4] для его раскрытия

рассматриваются комплексный подход и практические примеры применительно к морских транспортным узлам. Среди особенностей транспортного узла можно выделить:

- стремление к ускорению процесса доставки грузов;
- наличие сложности функций работы и протекающих процессов (взаимодействие различных видов транспорта, погрузка, выгрузка, сортировка, хранение грузов и т. д.);
- наличие системы управления, обеспечивающей интенсивное использование технических средств;
- достижения высокой пропускной способности и осуществление перевозок с минимальными затратами.

Систему транспортного узла можно описать следующим образом (рис. 1). Транспортный узел состоит из входов 5 и выходов 7, которыми являются транспортные средства (суда, грузовые автомобили). Транспортный узел функционирует в условиях различного вида возмущений, в том числе возмущений окружающей среды (вероятностный характер транспортных процессов, выход из строя технических средств, сбой в очередях обслуживания и др.), для компенсации которых вводятся управляющие воздействия  $U_{np.}$ , формируемые на основе информации, поступающей из внешних систем, которые основываются, как правило, на статистической информации о работе узла, получаемой по каналам обратной связи. Также происходит обмен информации с другими системами, окружающими транспортный узел. Согласно работам [4] – [7], в которых приведены практические примеры, информация о работе элемента узла в случае возникновения некоторого сбоя по обратной связи приходит с задержкой, причем последняя может отразиться на последующих технологических этапах обработки груза. В том числе на практике необходимо учитывать также человеческий фактор возникновения сбоя. К примеру, сбой в обработке контейнерного судна из-за технической поломки при разгрузке вызовет изменение в расписании движения судна и, в конечном итоге, может повлиять на время доставки. Множество подобных случайных факторов вынуждает использовать вероятностный аппарат.



Рис. 1. Общее представление транспортного узла

Кроме того, согласно работам [8], [9], необходимо учитывать наличие вероятностных процессов. Лицу, принимающему решение, необходимо найти наиболее значимые активные слабые места, в которых могут возникнуть задержки либо сбои. Но в реальной ситуации этого недостаточно, так как возможны ситуации системных задержек, которые спрогнозировать можно только с помощью моделирования. Также следует учитывать геометрические особенности (вместимость контейнерной площадки, количество морских фронтов и т. д.) транспортного узла, которые также могут быть источниками задержек при увеличении входного потока грузов. Используя имитационное моделирование как метод оптимизации отдельных узлов, можно получить степень нагрузки на тот или иной элемент системы или спрогнозировать возникновение внештатной ситуации и принимать решения по управлению или модернизации работы отдельного элемента, оценивая и улучшая при этом в итоге пропускную способность всей системы. Разработка эффективной координирующей системы управления технологическими процессами в транспортных узлах является одним из резервов снижения затрат на развитие перегрузочных мощностей и улучшение эксплуатационных и технико-экономических показателей их работы.

Имитационная модель должна содержать два уровня представления. *Первый уровень* представляет собой просчет различных вариантов работы терминала в зависимости от входного грузопотока и определения количественных характеристик работы, анализа загруженности. *Второй уровень* заключается в визуализации работы терминала. Перегрузочные процессы в транспортном узле рассматриваются как объекты моделирования, позволяющие решать задачи оптимального управления различными вариантами перегрузки грузов. Случайный характер процессов, протекающих в транспортных узлах, дает возможность рассматривать их отдельные модели как вероятностные и относить их тогда к моделям массового обслуживания, как показано в работах [10], [11].

Имитационная модель контейнерного терминала реализуется на основе ориентированного графа, который отражает последовательно все перегрузочные процессы транспортного узла. В каждом морском транспортном узле существует множество подсистем. Для составления ориентированного графа необходимо представить эти подсистемы узлами погрузки-разгрузки и представить вершинами некоторого графа. Множество дуг отражают направление перемещения грузов. Необходимо отметить, что при практической реализации имеет место суммирование объемов грузов либо транспорта, которыми нагружают ориентированный граф, который можно представить как матрицу перемещения грузов и матрицу передвижения транспортных средств.

Матричная модель, благодаря своей универсальности, позволяет с различных сторон взглянуть на задачу оптимизации различных по содержанию вариантов перегрузки грузов в транспортном узле. Матричная форма заложена во многие прикладные пакеты (FlexSim CT, AnyLogic и ряд других). В работе [4] представлен разработанный инструментарий, позволяющий на основе матричной формы прогнозировать грузопотоки, рассматривая морской порт и систему «сухих портов». Строки матрицы обозначают направления поэтапной перевозки грузов в транспортном узле. В любом порту известно количество приходящих судов, так как известно расписание, а наличие свободных перегрузочных машин является либо случайным, либо заданным в пределах граничных значений. Для каждого момента времени вероятность любого состояния системы зависит только от ее состояния в настоящем, при этом имеет место множество переходов. Таким образом, может быть спрогнозировано  $(n + 1)$  состояние системы.

Согласно работе [12], данная цепь обработки обоснованно является цепью Маркова, а значит можно применить соответствующий математический аппарат и представить её линейной стохастической сетью. Если все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, — пуассоновские, то процесс, протекающий в системе, будет Марковским. Вероятность  $j$ -го состояния системы тогда можно вычислить по формулам:

$$P_j = p_{ij} P_i, i, j = 1 \dots N; \quad (1)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{21} & p_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $p_{ij}$  — вероятность перехода за один шаг из состояния  $i$  в состояние  $j$ ;  $p_{ii}$  — вероятность задержки системы в состоянии  $i$ ;  $P$  — матрица вероятностей переходов.

Возможно, решение на каждом шаге задачи оптимизации управления перегрузочными процессами на практике может быть представлено необходимостью составления такого маршрута передвижения каждого грузопотока и транспортного средства внутри транспортного узла, чтобы обеспечить минимум затрат на перевозку грузов и сокращение времени обработки транспортных средств. Для терминала, конечно, достаточно сложно создавать граф вручную. Сейчас существует определенное количество программных систем, которые в процессе описания терминала позволяют автоматизированно создавать матричную форму. Данный математический аппарат на практике реализуется дискретно-событийным методом моделирования. Возможные перемещения грузов и транспортных средств реализуются с помощью множества *полилиний*, входящих как инструментальное средство в состав информационных систем. Данное множество вариантов размещается

с учетом реальной подложки или данных геоинформационной системы, которая представляет собой реальную схему терминала, возможно взятую в подходящем для реализации масштабе.

Объектом управления является технологический процесс, заключающийся в погрузке / выгрузке с транспортного средства контейнеров и их дальнейшую обработку в терминале. Часто контейнеры в штабеле размещены в произвольном порядке и при отгрузке нужного контейнера производятся лишние операции по перемещению контейнеров. Терминал является управляемой системой, на поведение которой оказывается целенаправленное воздействие. Отечественный и зарубежный опыт разработки автоматизированных систем управления показал, что среди объектов, подлежащих автоматизации, широкий класс образуют технологические процессы, которые являются сложными стохастическими объектами, подверженными действию внешней среды с плохо определенной математической моделью.

Учитывая воздействие внешней среды, структурно-адекватная модель терминала будет иметь следующий вид:

$$\vec{y} = f(\vec{x}, \vec{\theta}), \quad (3)$$

где  $y$  — прогнозируемое значение выходного показателя;  $f(x)$  — известная функция,  $\vec{x} \in X$  — вектор управляемых переменных;  $\vec{\theta}$  — вектор оценок параметров.

Под воздействием внешней среды подразумевается прибытие транспортных средств под погрузку / выгрузку. Прибытие транспортного средства и наличие сбоев носят стохастический характер. В связи с этим часто принятие управляющего решения происходит в условиях неопределенности. Чем больше система, тем больший объем данных необходимо анализировать и тем сложнее не совершить ошибки.

Развитие современного терминала связано с непрерывным использованием информации. Система функционирования контейнерного терминала зависит от точности информации. Роль информации заключается в устранении любых неопределенностей. Информация предназначена для упорядочения процессов перемещения контейнеров и транспортных средств, осуществления планирования деятельности терминала. Зачастую информация для оперативного управления поступает из различных источников (различных внутренних служб). Поэтому дополнительно возникает вопрос о ее правильном совмещении и точности. Среди наиболее часто встречающихся задач оперативного планирования можно выделить расчет количества заявок, обрабатываемых в каждом интервале работы контейнерного терминала, определение порядка обработки заявок, анализ максимальной загруженности, определение необходимого количества обрабатываемой входной поток техники.

В настоящее время открываются возможности интегрирования в информационные системы транспортных терминалов и узлов имитационных моделей, а также появляется возможность создания информационных транспортных моделей. Для повышения точности данных, поступающих на вход имитационной модели, необходимо интегрировать модуль анализа данных о транспорте и грузопотоке в режиме реального времени, например, на основе системы видеокамер и алгоритмов считывания информации из потока видеоданных.

### Методики сбора данных о работе транспортного узла

Для получения объективной и достоверной информации по работе исследуемой службы транспортного узла необходимо провести сбор данных одновременно в нескольких точках обследования, так как службы работают в тесной взаимосвязи и оказывают влияние друг на друга. На практике при исследовании процессов применимы три основных способа сбора информации.

1. *Ручной способ.* При ручном способе непосредственный сбор данных производится учетчиками транспорта. Сбор данных производится в течение определенного интервала времени. В конце информацию с рабочих листов специалист вносит в контрольную карту. В результате проведения замеров в контрольную карту заносятся данные об интенсивности работы, времени

обработки грузов, а также о распределении грузовых потоков. Данная статистическая информация должна быть введена в программное обеспечение для дальнейшего анализа.

2. *Полуавтоматический способ.* Полуавтоматический способ сбора информации заключается в том, что сбор информации осуществляется с помощью специального видеоборудования, которое позволяет выполнять съемку, а обработка собранной информации производится затем вручную. При этом данные вносятся сразу в базу данных, т. е. отсутствует этап ввода собранных данных в некоторую контрольную карту. Сбор данных для такого способа осуществляется с помощью таких устройств, как камеры видеонаблюдения. Для сбора информации со всех направлений движения внутри транспортного узла можно использовать систему купольных камер видеонаблюдения. К недостаткам таких устройств следует отнести неориентированность на сбор данных (их расположение не всегда может быть оптимальным для достижения необходимой цели).

Полученные видеоматериалы обрабатываются оператором ПК с использованием специализированного программного обеспечения для проведения учета грузопотока. Специализированное программное обеспечение позволяет оператору напрямую осуществлять ввод количества объектов с видеозаписи и в автоматическом режиме заполнять базу данных обследования интенсивности. Таким образом, существенным отличием второго способа сбора данных от первого является то, что непосредственный подсчет интенсивности движения потоков объектов производится одновременно с вводом информации в базу данных.

3. *Автоматический способ.* В третьем случае предполагается использование автоматизированного программного обеспечения, определяющего по видеозаписи число объектов и вносящее их непосредственно в базу данных, минуя оператора. В данном случае возможно наличие технической ошибки распознавания точного числа грузов. Экран отслеживания контейнеров и оборудования с использованием систем видеонаблюдения приведен на рис. 2.

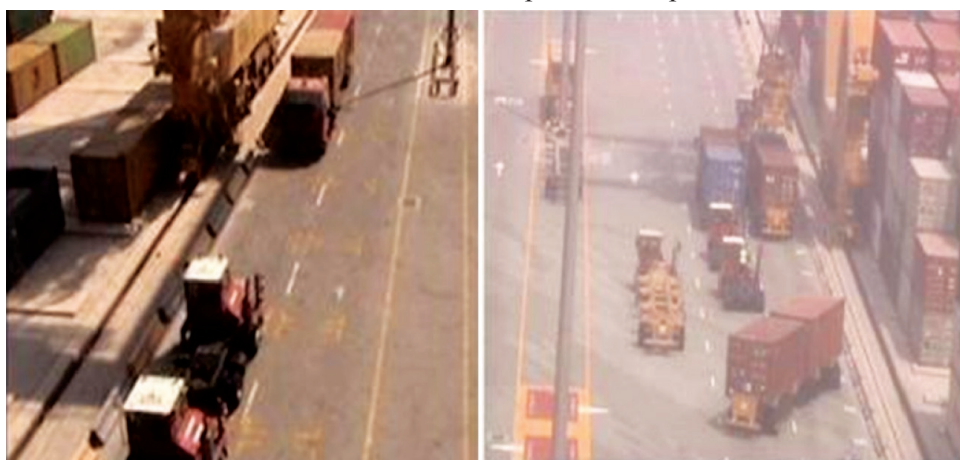


Рис. 2. Экран отслеживания контейнеров и оборудования с использованием систем видеонаблюдения

Отслеживание места, где контейнеры и оборудование расположены и где они концентрируются, является критически важным компонентом в работе терминала. Информация об их местонахождении позволит осуществить оптимизированное планирование местоположения и эффективной работы оборудования. Как отмечалось ранее, отслеживание контейнеров и оборудования только при помощи систем видеонаблюдения, с одной стороны, замедлит процесс, а с другой, потребует решения большого количества последующих оперативных задач.

В современных условиях ужесточающихся требований как к безопасности транспортного узла, так и к качеству работы, необходимо внедрять информационные транспортные модели, так как они позволяют проводить анализ работы контейнерного терминала в режиме реального времени. Необходимо отметить, что данные, поступающие от системы видеофиксации, могут поступать как непрерывно, так и дискретно. Предлагается в транспортных моделях

использовать блоки, моделирующие работу транспортного узла. Центральным компонентом системы является системная имитационная модель транспортного узла. Пример разработанного инструментария приведен в работе [13]. Виртуальная модель терминала может быть реализована с помощью следующих современных программных систем: AnyLogic, FlexSim, TBA и др. Входной информацией для данной модели будут геометрические параметры транспортного узла, прогнозируемый по расписанию поток объектов, данные от системы видеофиксации, а также плановое число обслуживающей техники. Практический пример реализации транспортной модели приведен на рис. 3.

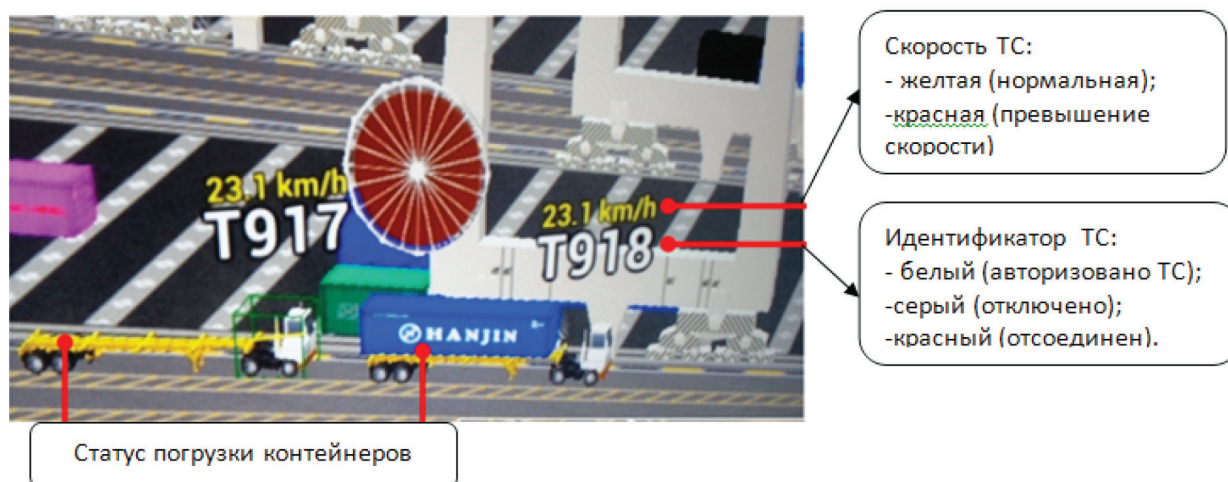


Рис. 3. Оконная форма учета перемещения грузового транспорта на контейнерном терминале и анализа производительности в транспортной модели

С этой точки зрения имитационная модель транспортного узла (ее трехмерная реализация), объединенная с системой видеофиксации, дает следующие возможности:

- позволяет решать группы прогнозных вопросов, касающихся как входного потока, так и возникновения внештатных ситуаций;
- позволяет на основе реальных данных от видеофиксации объектов моделировать различные ситуации и способствовать принятию правильных системных решений;
- позволяет передавать полученную после моделирования информацию в информационную среду транспортного узла;
- способствует созданию отдельного аналитического отдела для транспортного узла, реализующего задачи как прогнозирования, так и оперативного управления;
- повышает качество работы транспортного узла;
- повышает безопасность транспортного объекта.

Пример блок-схемы концепции организации транспортной модели контейнерного терминала с учетом системы видеофиксации и использованием имитационного моделирования приведен на рис 4, где приведены судно, портовый кран, терминальный тягач, козловой контейнерный кран и ЛПР. Основными требованиями такой системы является высокая точность моделирования и наивысшая производительность, которая позволила бы всего за считанные минуты получать прогноз грузопотока, а также оптимальное перемещение транспортных средств на несколько часов вперед. К алгоритму распознавания грузов и транспортных средств предъявляются высокие требования по точности. Для ЛПР открывается возможность выполнения значительного количества ограничений технических, экономических, которые взаимосвязаны между собой и подвержены влиянию многочисленных факторов. ЛПР может напрямую влиять на основные параметры контейнерного терминала, такие как время переработки одного контейнера, суточное количество перерабатываемых контейнеров, количество единиц техники, количество персонала путем принятия оперативных решений.



Рис. 4. Принципиальная схема использования транспортной модели на основе анализа видеоинформации с использованием имитационной модели контейнерного терминала

Необходимо отметить следующее: так как каждый транспортный узел обладает своей уникальностью, то универсальной программной системы создать не получится, для каждого объекта необходимо создать свою имитационную модель, включающую уникальные особенности терминала. Это на порядок усложняет внедрение и разработку подобных систем, но с другой стороны, улучшается качество принятия решений как оперативных, так и стратегических за счет непрерывного анализа и использования видеоинформации в режиме реального времени. Внедрение подобных систем повышает на порядок безопасность транспортного узла.

### Выводы

1. В работе обосновывается современная необходимость создания транспортных моделей. Их использование позволяет с помощью одного инструмента решить большое число практических задач, которые на практике решаются по отдельности. За счет того, что внутри транспортной модели используется имитационное моделирование, открывается возможность в любой момент времени внести любые изменения в транспортную модель, изменить условия обработки, внести изменения в расписание и ряд других.

2. В работе описывается математическое обеспечение работы контейнерного терминала, структурно-адекватная модель терминала и приводится принципиальная схема использования транспортной модели. При этом отмечаются как достоинства использования транспортных моделей, так и сложность их разработки, обусловленная тем, что каждый объект обладает своими особенностями.

3. В работе также отмечается, что использование транспортных моделей позволяет повысить безопасность транспортного объекта, т. е. решить очень актуальную задачу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров Н. Н. Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2012. — 185 с.
2. Кириченко А. В. Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. — 228 с.
3. Лазарев Н. Ф. Перегрузочные процессы в морских портах. Обработка и обслуживание судов / Н. Ф. Лазарев. — М.: Транспорт, 1987. — 197 с.
4. Понятовский В. В. Морские порты и транспорт (эволюция) / В. В. Понятовский. — М.: МГАВТ, 2006. — 429 с.
5. Container Terminals and Automated Transport Systems / [edited by] K. H. Kim, H.-O. Günther. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. — 374 p. DOI: 10.1007/b137951.
6. Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management / [edited by] D.-W. Song, Ph. M. Panayides. — London: Kogan Page Publishers, 2012. — 344 p.
7. Handbook of Terminal Planning / [edited by] Jürgen W. Böse. — Springer-Verlag New York, 2011. — 433 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.
8. Амосова Н. Н. Математика. Теория массового обслуживания / Н. Н. Амосова, Ю. Д. Максимов. — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. — 200 с.
9. Майоров Н. Н. Моделирование транспортных процессов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. — 165 с.
10. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.
11. Свидетельство № 19958. Алгоритм реализации имитационной модели работы морской контейнерной линии / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование» Государственной академии наук, 2014. — 6 с.
12. Шуршев В. Ф. Разработка математической модели для решения задач оптимизации управления перегрузочными процессами морского порта / В. Ф. Шуршев, Тхи Хыонг Чан // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2011. — № 1. — С. 83–88.
13. Майоров Н. Н. Моделирование контейнерооборота морской транспортной системы на основе математического аппарата гравитационной модели / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 26–33.

## RESEARCH OPERATIONAL MANAGEMENT CONTAINER TERMINAL BASED ON THE TRANSPORT MODEL AND SIMULATION

*The article based on the study of modern logistic processes of container terminal, characterized by dynamic variation, need to take account of diverse settings, as well as taking into account the criteria of safety, it is noted that for the transport hub is necessary to define a large number of parameters such as bandwidth, a certain amount of servicing equipment and other. as well as to improve security transport unit should be examined for vulnerabilities. To do this, you need to have tools that will help to solve these issues. It is proposed to use to solve problems and to develop specialized transport models that use simulations and data from video fixation systems. The article deals with the application of a systematic approach to the transport hub, of the description a mathematical technique for determining the state of the container terminal, adequate terminal model and review events practices fixing systems. In this paper we consider a fragment of a container terminal transport models and concluded that in practice there is the merits of the application of such models and the difficulties in their development.*

*Keywords: transport hub, simulation, probability characteristics, cargo, container terminal, transport model.*

## REFERENCES

1. Majorov, N. N. *Prakticheskie zadachi modelirovaniya transportnyh sistem*. SPb.: Izd-vo GUAP, 2012.
2. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznecov, O. A. Razhev, et al. *Vvedenie v transportnuju logistiku*. SPb.: Izd-vo GUAP, 2011.
3. Lazarev, N. F. *Peregruzochnye processy v morskikh portah. Obrabotka i obsluzhivanie sudov*. M.: Transport, 1987.
4. Ponjatovskij, V. V. *Morskie porty i transport (jevoljucija)*. M.: MGA VT, 2006.
5. *Container Terminals and Automated Transport Systems*. Ed. Kap Hwan Kim, Hans-Otto Günther. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. DOI: 10.1007/b137951.
6. *Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management*. Ed. D.-W. Song, Ph. M. Panayides. London: Kogan Page Publishers, 2012.
7. *Handbook of Terminal Planning*. Ed. Jürgen W. Böse. Springer-Verlag New York, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.
8. Amosova, N. N., and Ju. D. Maksimov. *Matematika. Teorija massovogo obsluzhivaniya*. SPb.: Izd-vo Politeh, 2013.
9. Majorov, N. N., and V. A. Feti-sov. *Modelirovanie transportnyh processov*. SPb.: Izd-vo GUAP, 2011.
10. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 3–7.
11. Majorov N. N., and V. A. Fetisov. Algoritm realizacii imitacionnoj modeli raboty morskoy kontejnernoj linii. Certificate № 19958. Obedinennyj fond jelektronnyh resursov «Nauka i obrazovanie» Gosudarstvennoj Akademii Nauk, 2014.
12. Tran, Thi Huong, and Valeriy Fedorovich Shurshev. "Development of the mathematical model for optimization of management of seaport transfer processes." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 1 (2011): 83–88.
13. Majorov, Nikolaj Nikolaevich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Modeling of marine container transport system on the basis of the mathematical apparatus of the gravity model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 26–33.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич —  
кандидат технических наук, доцент.  
ГУАП  
sciencesuai@yandex.ru  
Кириченко Александр Викторович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
KirichenkoAV@gumrf.ru  
Фетисов Владимир Андреевич —  
доктор технических наук, профессор.  
ГУАП  
FetI@aanet.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maivorov Nikolai Nikolaevich —  
PhD, associate professor.  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
sciencesuai@yandex.ru  
Kirichenko Aleksandr Viktorovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
KirichenkoAV@gumrf.ru  
Fetisov Vladimir Andreevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
FetI@aanet.ru

Статья поступила в редакцию 29 марта 2016 года

## **АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕКУЩЕЙ И АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

*В рамках существующих представлений о разрешении проблемных навигационных ситуаций, связанных с обеспечением безопасности плавания судна, предложен новый вариант алгоритма прогноза параметров зоны навигационной безопасности, основанный на использовании как текущей, так и априорной навигационной информации. В статье показано, что правильный выбор текущей и априорной составляющих навигационной информации с учетом их взаимосвязанности позволяет одновременно повысить при прогнозе как оценку экономической эффективности, так и оценку показателя безопасности плавания судна. Алгоритм предложен в виде последовательности рекуррентных соотношений, связывающих параметры множественных оценок и имеющих вид многомерных эллипсоидов в пространстве состояний эффективности и безопасности плавания судна по заданному навигационному маршруту. Доказано, что прогноз зоны навигационной безопасности должен осуществляться не минимальными по объему эллипсоидами, а такими, у которых объемы не возрастают по сравнению с исходным эллипсоидом. Сделан вывод о том, что предложенный алгоритм, не ухудшая процедур расчета параметров этой зоны, будет более предпочтительным, чем алгоритмы, использующие только априорные навигационные данные.*

*Ключевые слова: прогноз зоны навигационной безопасности, априорная информация, текущая информация, рекуррентный алгоритм, оценка безопасности мореплавания.*

### **Введение**

Главной целью данного исследования является построение алгоритма, прогнозирующего состояния безопасности судна при планировании навигационного маршрута. Пусть известен набор факторов, которые можно отнести к числу «подозрительных» по степени их влияния на значения параметров навигационной зоны безопасности, характеризующих общее состояние безопасности мореплавания. Требуется получить по возможности наиболее точные прогнозы этих параметров в различные промежутки времени (глубины прогноза), используя статистику факторов и их параметров, полученную на предыдущих реализациях планируемого навигационного маршрута [1, с. 87], [2, с. 734]. При этом необходимо отметить, что лицо, ответственное за планирование навигационного маршрута, обычно располагает достаточно существенными сведениями о процессах, происходящих в данном навигационном районе, в отличие от информации о факторах и параметрах состояния безопасности судна [3, с. 109], [4, с. 241]. Например, лицу, которое планирует навигационный переход, оказываются известными или частично известными многие промежуточные механизмы протекания гидрометеорологических процессов в данном навигационном районе [5, с. 109].

### **Постановка задачи по формированию зоны навигационной безопасности в рамках требований максимальной полезности**

Пусть текущее состояние навигационной безопасности судна характеризуется неопределенным или многозначным вектором  $\xi \in X \subseteq R^n$ , который определен в  $n$ -мерном векторном пространстве  $R^n$ , обладающим достаточно обширным подпространством  $X$ , к которому вектора  $\xi$  заведомо принадлежат. Кроме того, пусть задано компактное множество  $Q_\xi \subset X$ , которое содержит любую реализацию вектора  $\xi$  и является допустимым множеством. Тогда траекторию состояний навигационной безопасности при плавании судна можно задать с помощью последовательности, заданной в виде

$$\{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_j, \dots\} \in X_0 \times X_1 \times \dots \times X_j \times \dots \quad (1)$$

Если, в свою очередь, отождествить эту последовательность со значениями дискретного времени  $t = 0, 1, \dots, j$  на конечном интервале  $T_0' \equiv (0, 1, \dots, t)$ , то усеченное отношение

$$\xi_0' \equiv \{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_t\} \in X_0' \equiv X_0 \times X_1 \times \dots \times X_t \quad (2)$$

является конечной последовательностью, составленной из первых элементов последовательности (1), для которой имеет место вложение вида  $Q_{\xi,t} \subset X_0'$ . Такое представление компактного допустимого множества  $Q_{\xi,t}$  позволяет считать, что все реализации (2) будут в него обязательно включены.

Очевидно, что при сформулированных условиях процесс (1) реализуется в классе ограниченных по норме последовательностей. Поэтому, если далее предположить, что каждое состояние траектории которое начинается с  $j = 1$ , измеримо, то состояние  $x_j \in X_j$  и результат его измерения  $y_j \in Y_j \subseteq R^m$  находятся в виде

$$S_j = \{(x_j, y_j) : \|(B_j^{-1})^{1/2}(y_j - F_j x_j)\| \leq c_j\} \subset X_j \times Y_j, \quad (3)$$

где для всех значений  $j B_j > 0$  —  $(n \times n)$  — симметрическая матрица;  $F_j$  —  $(m \times n)$  — матрица максимального ранга;  $c_j \geq 0$  — вещественная константа;  $Y_j \subseteq R^m$  — пространство измерений размерности  $m \leq n$ .

В рамках представления о разрешении проблемных навигационных ситуаций, связанных с обеспечением безопасности плавания [5, с. 95], [6, с. 123], [7, с. 33], алгоритм такого разрешения должен быть обеспечен информацией, которую можно представить следующей совокупностью:

$$I = (I_1, I_2),$$

где  $I_1$  — априорная информация о состоянии судна, объекта лова и окружающей среде, используемая в механизме предвидения (планирование технологии добычи), т. е. информация, которая задается заранее и не изменяется в течение длительного времени;  $I_2$  — текущая переменная информация, получаемая судоводителем в процессе ведения промысла и управления промысловыми операциями.

Правильный выбор составляющих  $I_1$  и  $I_2$  с учетом их взаимосвязанности является одним из способов одновременного повышения как экономической эффективности, так и безопасности плавания. Предельную величину эффективности и безопасности можно представить как величину максимальной полезности, записанную в виде

$$P = \max p(I_1, I_2). \quad (4)$$

$$I_1, I_2.$$

Поэтому далее в рамках максимальной полезности (4) и представлений о траектории состояний безопасности плавания, заданной выражениями (1) – (3), рассмотрим задачу по составлению алгоритмов построения оценивающих эллипсоидов, которые способны формировать зону навигационной безопасности. Причем эти алгоритмы должны «работать» как при наличии текущих и априорных навигационных данных, так и априорных навигационных данных [8, с. 121].

#### **Алгоритм построение эллипсоидов, оценивающих зону навигационной безопасности с учетом априорных данных**

В данном случае речь будет идти о разработке способа построения  $n$ -мерных эллипсоидов безопасной навигации  $L_t \subset X_t$  для которых  $x_t \in L_t$  при любой реализации вектора  $\xi_0'$  без учета измерительной информации. Пусть далее  $D \subset X_t$  — компактное множество. Обозначим через  $[D]_0$  класс всех  $n$ -мерных эллипсоидов, содержащих (покрывающих) множество  $D$ . Пусть  $[D]_j'$  — конкретный элемент класса  $[D]_j$ , причем  $[D]_j' \in [D]_j$  и  $[D]_j' \supseteq D$ . Тогда поставленную задачу можно решить следующим рекуррентным относительно искомого оценивающего эллипсоида  $L_t$  способом, который с формальной точки зрения может быть задан в виде

$$L_t = [Q_{\xi,t}(L_{t-1})]', \quad (5)$$

с учетом начального множества  $L_0 = Q_{\xi}$ .

При этом множество

$$Q_{\xi,t}(L_{t-1}) = \cup Q_{\xi,t}(x_{t-1}) \quad (6)$$

будет являться образом множества  $L_{t-1}$  при его преобразовании с помощью многозначного отображения, заданного как  $Q_{\xi,t}$ .

При выборе способа построения покрывающего эллипсоида  $[Q_{\xi,t}(L_{t-1})]'$ , естественно стремиться к тому, чтобы его  $n$ -мерный объем был минимален [9, с. 83], [10, с. 393]. Только тогда он будет оптимальным в классе оценивающих множеств типа  $n$ -мерных эллипсоидов.

С целью упрощения процедуры экстраполяции покрывающий эллипсоид далее будем строить некоторым *субоптимальным способом* при следующем допущении. Однако прежде чем перейти к формулировке этого допущения, найдем предварительно множество-образ  $Q_{\xi,t}(L_{t-1})$ , где  $L_{t-1} = (H_{t-1}, x_{t-1}^*)$ , причем  $H_{t-1}, x_{t-1}^*$  — некоторые фиксированные и заданные параметры. Перепишем множества  $Q_{\xi,t}(x_{t-1})$  и  $L_{t-1}$  в параметризованном виде. Для этого введем вспомогательные параметры  $\zeta_t \in X_t$  и  $\varphi_{t-1} \in X_{t-1}$ , и используя их найдем:

$$Q_{\xi,t}(x_{t-1}) = \{x_t: x_t = Ax_{t-1} + \zeta_t, \|(W_t^{-1})^{1/2}\zeta_t\| \leq \omega\};$$

$$L_{t-1} = \{x_t: x_t = x_{t-1}^* + \varphi_{t-1}, \|(H_{t-1}^{-1})^{1/2}\varphi_{t-1}\| \leq 1\}.$$

Тогда для искомого образа можно найти выражение

$$Q_{\xi,t}(L_{t-1}^*) = \{x_t: x_t = Ax_{t-1}^* + A\varphi_{t-1} + \zeta_t, \|(W_t^{-1})^{1/2}\zeta_t\| \leq \omega \|(H_{t-1}^{-1})^{1/2}\varphi_{t-1}\| \leq 1\}, \quad (7)$$

которое и позволяет сформулировать следующее допущение: *если заданы два многозначных вектора  $\gamma$  и  $\lambda$  в множестве  $R^n$  с допустимыми множествами:*

$$\Gamma = \{x \in R^n: \|(E^{-1})^{1/2}x\| \leq e\};$$

$$\Lambda = \{x: \|(P^{-1})^{1/2}x\| \leq p\}$$

*соответственно, где  $E > 0$  и  $P > 0$  — симметрические  $(n \times n)$ -матрицы;  $e \geq 0$  и  $p \geq 0$  — константы, одновременно неравные нулю, то значения многозначного вектора  $\mu = \gamma + \lambda$  будут принадлежать множеству*

$$M \subset R^n: ((p + e)(eE + pP), 0).$$

Следует обратить внимание на то, что в принятом допущении эллипсоид  $M$  не является эллипсоидом минимального  $n$ -мерного объема. Однако в случае, когда  $p/e \rightarrow 0$  либо  $e/p \rightarrow 0$ , он асимптотически стремится к такому эллипсоиду, совпадая в пределе с множеством  $\Gamma$  или  $\Lambda$  соответственно.

Если воспользоваться сформулированным допущением и привлечь параметрическое представление (7), то можно найти покрывающий эллипсоид  $[Q_{\xi,t}(L_{t-1})]'$ , а с учетом выражения (1) записать следующие рекуррентные уравнения, связывающие параметры множеств  $L_t^*$  и  $L_{t-1}^*$ :

$$x_t^* = Ax_{t-1}^*; \quad (8)$$

$$H_t^* = (1 + \omega)AH_t^*A^T + (1 + \omega)\omega W_t, \quad (9)$$

где  $x_0^* = x_0$  и  $H_0^* = Q_0$ .

Ограниченность параметров фильтра (8), (9) требует, чтобы условие  $\|A\| < 1$  было усилено. Данный факт является следствием введенной операции покрытия образа (7)  $n$ -мерным эллипсоидом. В результате этой операции к покрываемому множеству присоединяются дополнительные участки. Если параметр  $\omega = 0$ , то образ эллипсоида  $L_{t-1}$  остается эллипсоидом. Операция покрытия становится излишней, и требования к матрице  $A$  в модели фильтруемого процесса могут быть ослаблены.

### Алгоритм построение эллипсоидов, оценивающих зону навигационной безопасности с учетом текущих и априорных данных

Представление о состоянии безопасности плавания судна  $x_t$  в каждый момент  $t$  дискретного времени в общем случае может складываться из двух информационных составляющих (4). С одной стороны, вектор  $x_t$  можно оценить на основе априорных данных (множество-образ  $[Q_{\xi,t}(L_{t-1})]$ ), а с другой — информация о том же векторе содержится в множестве-прообразе  $S_t^{-1}(y_t)$  измерений  $y_t$ . Это множество, в соответствии с выражением (3), для данного варианта информационного обеспечения безопасности плавания можно записать в виде

$$S_t^{-1}(y_t) = \{x_t : \|(B_t^{-1})^{1/2}(y_t - F_t x_t)\| \leq c_t\} \subset X_t,$$

где вектор  $y_t \in Y_t$  фиксирован.

Тогда алгоритм построения искомого оценивающего множества, образующего зону навигационной безопасности, аналогично можно составить следующим образом:

$$L_t = [S_t^{-1}(y_t) \cap [Q_{\xi,t}(L_{t-1})]']^*, \quad (10)$$

где  $L_0 = Q_{\xi,0}$ .

Звездочкой отмечен конкретный эллипсоид из класса всех  $n$ -мерных эллипсоидов, покрывающих пересечение множеств, заключенных во внешние квадратные скобки. На выбор этого эллипсоида наложим требование

$$|L_t| < |[Q_{\xi,t}(L_{t-1})']|, \quad (11)$$

гарантирующее улучшение качества оценки за счет учета измерительной информации. В тех случаях, когда требование (11) не удастся обеспечить, будет иметь место отношение

$$[S_t^{-1}(y_t) \cap [Q_{\xi,t}(L_{t-1})']]^* \equiv [Q_{\xi,t}(L_{t-1})']^*,$$

которое показывает появление неинформативных измерений  $y_t$ . В частности, измерение  $y_t$  неинформативно, если выполняется вложение

$$S_t^{-1}(y_t) \supset [Q_{\xi,t}(L_{t-1})']^*.$$

Для построения покрывающего эллипсоида, который удовлетворяет требованиям, примем следующее вспомогательное допущение: пусть пересечение  $n$ -мерного эллипсоида  $\Theta_0 \subset R^n: (K_0, x_0^*)$  и множества  $\Xi = \{x \in R^n : \|(B^{-1})^{1/2}(y_0^* - Fx)\| \leq c\}$  не является пустым. Тогда введенное допущение позволяет считать, что  $n$ -мерный эллипсоид

$$\Theta_1 \subset R^n: (K_1, x_1^*),$$

покрывающий пересечение  $\Theta_0 \cap \Xi$ , может быть определен следующими параметрами:

$$x_1^* = x_0^* + (K_0 h^* / \| (K_0)^{-1} h^* \|) \rho; \quad (12)$$

$$K_1 = [K_0 - (1 - \beta^2) (K_0 h^* h^{*T} K_0) / \| (K_0)^{1/2} h^* \|^2] ((1 - \rho) / \beta)^2, \quad (13)$$

если параметр

$$\rho \equiv ((1/n) + 1) (1 + (n \Delta \| (B^{-1})^{1/2} z_0^* \| / \| (K_0)^{-1} h^* \|)) \in (0, 1), \quad (14)$$

иначе  $x_1^* = x_0^*$ ,  $K_1 = K_0$ .

При этом для выражения (14) будет иметь место равенство

$$|\Theta_1| < |\Theta_0|.$$

Здесь следует заметить, что в выражениях (12) – (14) используются следующие обозначения:

$$\Delta = -c + \| (B^{-1})^{1/2} z_0^* \|; \beta^2 = (1 - \rho) / [1 + ((n + 1) / (n - 1))\rho]; \quad (15)$$

$$h^* = F^T B^{-1} z_0^*, z_0^* = y_0^* - F x_0^*. \quad (16)$$

где  $\mathbf{x}_0^* \in R^n$  и  $\mathbf{y}_0^* \in R^n$  — фиксированные векторы;  $K_0 > 0$  и  $B > 0$  — симметрические матрицы размерностей  $(n \times n)$  и  $(m \times m)$  соответственно;  $F$  —  $(m \times n)$ -матрица ранга  $m$ ,  $c \geq 0$  — вещественная константа.

Эллипсоид  $\Theta_1$  не минимален (по объему), основное его свойство состоит в том, что он не возрастает в объеме по сравнению с исходным эллипсоидом. Это свойство позволяет удовлетворить требование (11), т. е. обеспечить неухудшение процедуры расчета с учетом измерений по отношению к алгоритму, использующему только априорные данные. С целью уменьшения объема результирующего эллипсоида  $\Theta_1$  процедуру расчета (12) – (16) можно «заиклеть», считая эллипсоид  $\Theta_1$ , полученный на первой итерации, исходным эллипсоидом для последующей итерации. Эти вычисления следует прекратить после первого нарушения условия (14).

Возвращаясь к уравнению (10), найдем параметры  $H_{t|t-1}$  и  $\mathbf{x}_{t|t-1}$  эллипсоида  $[Q_{\xi,t}(L_{t-1})]'$ , покрывающего множество-образ  $Q_{\xi,t}(L_{t-1})$ . При этом параметры оценивающего эллипсоида  $L_{t-1}(\mathbf{x}_{t|t-1}, H_{t|t-1})$  будем считать заданными. Тогда по аналогии с соотношениями (19) и (20) сразу можно найти:

$$\mathbf{x}_{t|t-1} = A\mathbf{x}_{t-1}^* \quad (17)$$

$$H_{t|t-1} = (1 + \omega)(AH_{t-1}A^T + \omega W_t). \quad (18)$$

Данные параметры будут выполнять роль вектора  $\mathbf{x}_0^*$  и матрицы  $K_0$ , а для множества  $L_t$ ;  $(H_t, \mathbf{x}_t^*)$ , в соответствии с алгоритмом (10), можно окончательно получить:

$$\mathbf{x}_t^* = \mathbf{x}_{t|t-1} + (H_{t|t-1} \mathbf{h}_t^* / \|(H_{t|t-1} \mathbf{h}_t^*)\|) \rho_t; \quad (19)$$

$$H_t = [H_{t|t-1} - (1 - \beta_t^2)(H_{t|t-1} \mathbf{h}_t^* \mathbf{h}_t^{*T} H_{t|t-1}) / \|(H_{t|t-1} \mathbf{h}_t^*)\|^2] ((1 - \rho_t) / \beta_t)^2, \quad (20)$$

если параметр

$$\rho \equiv ((1/n) + 1)(1 + (n\Delta_t \|(B_t^{-1})^{1/2} \mathbf{z}_{t|t-1}\|)) / \|(H_{t|t-1})^{1/2} \mathbf{h}_t^*\| \in (0, 1), \quad (21)$$

иначе

$$\mathbf{x}_t^* = \mathbf{x}_{t|t-1}, H_t = H_{t|t-1}, \quad (22)$$

где

$$\mathbf{z}_{t|t-1} = \mathbf{y}_t - F\mathbf{x}_{t|t-1}, \mathbf{h}_t^* = F_t B_t^{-1} \mathbf{z}_{t|t-1}; \quad (23)$$

$$\Delta_t = -c_t + \|(B^{-1})^{1/2} \mathbf{z}_{t|t-1}\|; \beta_t^2 = (1 - \rho_t) / [1 + ((n + 1) / (n - 1)) \rho_t]. \quad (24)$$

Начальными значениями рекуррентно вычисляемых элементов в соотношениях (17) – (20) служат соответствующие параметры эллипсоида (10):

$$H_0 = Q_0; \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_0^*. \quad (25)$$

Таким образом, соотношения (19) – (22), с учетом входящих в них параметров (17), (18), (23), (24) при условиях (25), могут быть представлены как искомый алгоритм расчета текущей зоны навигационной безопасности от текущих и априорных навигационных данных. Предложенный алгоритм может быть рекомендован к использованию в составе программного продукта электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС) для оценки состояния безопасного плавания судна по заданным курсам при прохождении, например, узкостей [11].

### Выводы

1. Получены математические зависимости, обеспечивающие наиболее точные прогнозы параметров зоны навигационной безопасности для различных промежутков времени (глубины прогноза), статистики факторов и параметров, полученных при предыдущих реализациях планируемого навигационного маршрута.

2. Сформулирована задача по составлению алгоритма, который обеспечивает построение оценивающих эллипсоидов и формирует зону навигационной безопасности, причем этот алгоритм

«работает» как при наличии текущих и априорных навигационных данных, так и при наличии только априорных навигационных данных.

3. Расчет параметров зоны навигационной безопасности для различных промежутков времени должен быть основан на предложенной последовательности вычислений, а дополнительный учет граничных условий окончательно формируется искомый алгоритм расчета текущей зоны навигационной безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладышевский М. А. Организационно-технические структуры, обеспечивающие безопасную эксплуатацию судна / М. А. Гладышевский, М. А. Пасечников, К. В. Пеньковская. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2008. — 212 с.
2. Кулезнев И. А. Оценка позитивной полноты планирования навигационных маршрутов / И. А. Кулезнев, М. С. Житняк, В. И. Меньшиков // Вестник МГТУ. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 734–736.
3. Карташов С. В. Диагностика состояния мореплавания судна с использованием принципа статистического согласия / С. В. Карташов, В. И. Меньшиков // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 2. — С. 108–109.
4. Дмитриев В. И. Организационно-технические основы безопасности судов и портовых средств: монография / В. И. Дмитриев [и др.]; под ред. А. В. Кириченко, С. В. Латухова. — СПб.: ГАОУ СПО «Санкт-Петербургский морской технический колледж», 2014. — 365 с.
5. Агарков С. А. Анализ результатов моделирования движения танкера в условиях ветровых нагрузок / С. А. Агарков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 16–22.
6. Никитин Н. И. Структурная идентификация и разрешение проблемных промысловых и навигационных ситуаций // Рыбное хозяйство. — 2012. — № 5. — С. 94–96.
7. Кукуи Ф. Д. Основные процессы в структурах безопасной эксплуатации судна / Ф. Д. Кукуи, Н. А. Анисимов, А. А. Анисимов. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2008. — 185 с.
8. Карташов С. В. Обеспечение безопасности мореплавания с учетом дополнительных источников навигационной информации и полной информированности судоводителя / С. В. Карташов, В. И. Меньшиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 1. — С. 32–36.
9. Катенин В. А. Навигационное обеспечение судовождения / В. А. Катенин, В. И. Дмитриев. — М.: Академкнига, 2006. — 372 с.
10. Дмитриев В. И. Практика мореплавания (Practice of navigation) / В. И. Дмитриев. — СПб.: Элмор, 2009. — 231 с.
11. Железный Г. М. Судоводителям. Опыт и знание: практ. пособие / Г. М. Железный, А. И. Задорожный, В. Н. Щербак; под общ. ред. Г. М. Железного. — Одесса: КП ОГТ, 2009. — 521 с.

## THE ALGORITHM FOR CALCULATING THE NAVIGATION SECURITY ZONE PARAMETERS WITH THE ACCOUNT OF CURRENT AND A PRIORI INFORMATION

*Within the scope of current conception which deals with problem navigational situations connected with providing safe navigation a new version of the algorithm for the prognosis of navigation security zone parameters based on using both current and a priori navigational information is being introduced.*

*The article shows that the correct choice of current and a priori components of navigational information with the account of their interrelation makes it possible to simultaneously improve, while forecasting, both estimation of economic efficiency and estimation of safe navigation index.*

*The algorithm is presented in the form of recurrent correlations binding the parameters of multiple estimations which look like multidimensional ellipsoids in the amplitude of efficiency states and navigational security on a set navigational route.*

*It is proved that the navigation security zone forecast is to be fulfilled by the ellipsoid not minimum in volume but by those ellipsoids volumes of which do not grow compared to the initial ellipsoid.*

*Conclusion is drawn that the algorithm being presented, while not deteriorating the process of calculating the parameters of the zone, will be more preferable when compared to other algorithms that use a priori navigational data solely.*

*Keywords: forecast of the navigation security zone, a priori information, current information, recurrent algorithm, estimation of safe navigation.*

## REFERENCES

1. Gladyshevskij, M. A., M. A. Pasechnikov, and K. V. Penkovskaja. *Organizacionno-tehnicheskie struktury, obespechivajushhie bezopas-nuju jekspluataciju sudna*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2008.
2. Kuleznev, I. A., M. S. Zhitnyak, and V. I. Men'shikov. "Estimation of positive completeness of navigation routes planning." *Proceedings of the MSTU* 16.4 (2013): 734–736.
3. Kartashov, S. V., and V. I. Menshikov. "The vessel's navigation condition diagnostic through fitting criteria." *Fisheries* 2 (2014): 108–109.
4. Dmitriev, V. I., et al. *Organizacionno-tehnicheskie osnovy bezopasnosti sudov i portovyh sredstv : monografija*. Ed. A. V. Kirichenko, S. V. Latuhov. SPb.: GAOC SPO «Sankt-Peterburgskij morskoy tehnikeskij kolledzh», 2014.
5. Agarkov, S. A. "Analiz rezultatov modelirovaniya dvizheniya tankera v usloviyah vetrovyh nagruzok." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 16–22.
6. Nikitin, N. I., I. I. Ziva, S. I. Poznyakov, and V. I. Menshikov. "Structural identification and solving of problem fishing or navigational situations." *Fisheries* 5 (2012): 94–96.
7. Kukui, F. D., N. A. Anisimov, and A. A. Anisimov. *Osnovnye processy v strukturah bezopasnoj jekspluatacii sudna*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2008.
8. Kartashov, Sergey Veniaminovich, and Vyacheslav Ivanovich Menshikov. "Ensuring safety of navigation taking into account additional sources of navigation data and ultimate awareness of navigator." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2015): 32–36.
9. Katenin, V. A., and V. I. Dmitriev. *Navigacionnoe obespechenie sudovozhdeniya*. M.: Akademkniga, 2006.
10. Dmitriev, V. I. *Praktika moreplavaniya = Practice of navigation*. SPb.: Jelmor, 2009.
11. Zheleznyj, G. M., A. I. Zadorozhnyj, and V. N. Shherbak. *Sudovoditeljam. Opyt i znanie: prakt. posobie*. Ed. G. M. Zheleznoi. Odessa: KP OGT, 2009.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гроховский Владимир Александрович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ «Мурманский государственный  
технический университет»  
GrohovskiyVA@mstu.edu.ru  
Меньшиков Вячеслав Иванович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ «Мурманский государственный  
технический университет»  
kseniaMGTU@rambler.ru  
Агарков Сергей Анатольевич —  
доктор экономических наук, доцент.  
ФГБОУ «Мурманский государственный  
технический университет»  
AgarkovSA@mstu.edu.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grokhovsky Vladimir Alexandrovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
FSEI HPE «Murmansk State  
Technical University»  
grohovskiyva@mstu.edu.ru  
Menshikov Vyacheslav Ivanovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor,  
FSEI HPE «Murmansk State  
Technical University»  
KseniaMGTU@rambler.ru  
Agarkov Sergey Anatolievich —  
Dr. of Economic Sciences, associate professor.  
FSEI HPE «Murmansk State  
Technical University»  
AgarkovSA@mstu.edu.ru

*Статья поступила в редакцию 21 апреля 2016 г.*

## АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ СУДНА

*Рассматривается методика определения оптимального по точности (сходимости) алгоритма обучения нейронной сети, прогнозирующей счислимые координаты судна. Данная методика основана на сравнении работы нескольких алгоритмов и реализована в два этапа. На первом этапе обучения определяется оптимальный алгоритм обучения при фиксированном числе итераций. Для каждого рассмотренного количества итераций алгоритм запускается по десять раз, и определяются характеристики точности прогноза сетью траектории. Для каждого числа итераций определяется среднее время обучения для наиболее точного алгоритма. Это время используется на втором этапе обучения, где оно задаётся одинаковым для всех алгоритмов. Они также запускаются по десять раз. Для каждого заданного значения времени определяется более точный алгоритм. Оптимальным по точности алгоритмом считается тот, который оказался самым точным для большинства моментов времени. На всех этапах основным критерием точности является наибольшее из десяти значений максимума модуля невязки на тестовой выборке.*

*Ключевые слова:* нейронная сеть, счисление пути судна, алгоритм обучения, тестирование, координаты.

### Введение

В настоящее время определение местоположения судна выполняется, главным образом, при помощи спутниковых навигационных систем, позволяющих получать координаты с высокой точностью и секундной дискретностью. Однако, несмотря на успехи в развитии технологий спутниковой навигации в последние десятилетия, её методы имеют существенный недостаток — неавтономность, что не позволяет использовать спутниковую систему при наступлении ряда известных обстоятельств. В связи с этим вопросы изучения автономных методов определения места судна — счисления — представляют практический интерес и в наши дни.

Погрешность счисления зависит от того, какой набор датчиков используется в качестве источника навигационной информации. Как правило, на судах торгового флота для определения счислимых координат применяются относительный лаг, измеряющий продольную составляющую скорости, и гирокомпас. В ряде случаев относительный лаг может измерять и поперечную составляющую относительной скорости. На крупнотоннажных судах устанавливается абсолютный лаг, измеряющий продольную и поперечную составляющие скорости судна. На некоторых кораблях определение счислимых координат возможно также и на основе инерциальной системы. Какой бы набор датчиков ни использовался, переход от измерений к координатам осуществляется, так или иначе, на основе определённого алгоритма. Этот алгоритм обязательно включает схему численного интегрирования параметров движения судна (ускорения или/и скорости), которая характеризуется определёнными методическими погрешностями. При использовании одноканального относительного лага в указанный алгоритм может быть включена также методика определения скорости (угла) дрейфа судна, характеризующаяся, в общем случае, погрешностями методического и теоретического плана.

Традиционные алгоритмы численного интегрирования обладают тем недостатком, что основаны они на замене подынтегральной функции её аппроксимацией, обычно линейной. В связи с этим представляет интерес разработка новых *нелинейных* методов обработки навигационной информации, не содержащих в своей основе предположений о конкретном виде интегрируемых параметров движения судна как функций времени. Построение подобных алгоритмов возможно на основе нейронных сетей, обладающих универсальными свойствами нелинейности при решении ряда прикладных задач [1], [2].

Варианты использования нейронных сетей для прогноза параметров движения судна описаны, например, в работах [3] – [5]. В данных исследованиях нейронная сеть выполняет функцию идентификации модели движения судна. Несколько иной подход к применению нейросетевых технологий для оценки навигационных параметров судна предлагается в статьях [6] – [8], где нейронные сети используются для прогноза траектории, а коррекция их свободных параметров выполняется в режиме реального времени по мере движения судна. В большинстве из указанных исследований не учитываются внешние факторы — ветер и волнение — при синтезе нейросетевых систем. Более того, проверка работоспособности нейронных сетей выполняется только для узких классов манёвров типа «циркуляция» и «зигзаг», а точность их в других навигационных ситуациях не исследуется. Использование же нейронной сети для определения счислимых координат судна предполагает её тестирование на множестве различных входных сигналов, которые могут иметь место в ходе эксплуатации судна.

Построение моделей счисления пути судна на основе нейронных сетей описывается, например, в работе [9], где предложены три варианта нейронных сетей, прогнозирующих скорость дрейфа судна в условиях внешних факторов. В исследовании [10] предлагается построение нейронной сети, прогнозирующей координаты судна на основе измерений относительного лага и гирокомаса. В [11], [12] предлагаются различные варианты синтеза нейросетевых систем счисления, прогнозирующих координаты судна (приращения к ним) при различных комплектациях датчиков автономной навигационной информации. В данных исследованиях использовались различные методы обучения нейросетевых систем. При этом выбор алгоритма обучения происходил, как правило, на основе общеизвестных рекомендаций и практики для решения подобного рода задач. В связи с этим интерес представляет исследование сходимости различных алгоритмов обучения конкретной нейросетевой системы счисления пути судна. Такой подход дает возможность определить алгоритм обучения, применение которого позволяет настроить нейронную сеть оптимальным, с точки зрения её точности, образом.

### Архитектура нейронной системы счисления

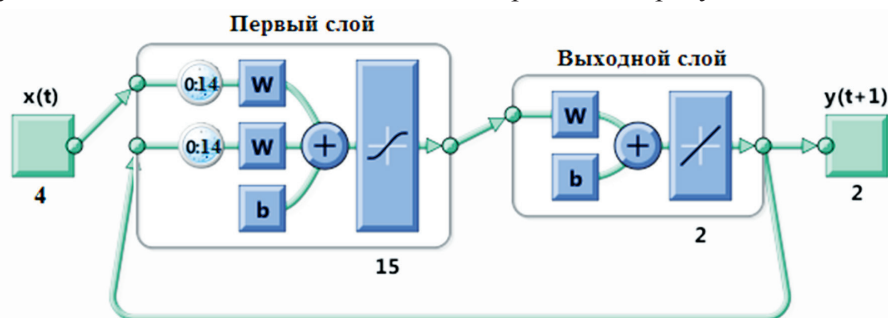
Исследование сходимости алгоритмов обучения будем выполнять для нейронной сети, прогнозирующей координаты судна по известным значениям его курса и составляющих относительной скорости [10]. Синтез и тестирование указанной сети рассматриваются также в [11], [12]. Входной вектор  $X$  имеет вид

$$X = (\sin K, \cos K, V_{ox1}, V_{oy1})^T,$$

где  $K$  — истинный курс судна;  $V_{ox1}, V_{oy1}$  — продольная и поперечная составляющие его относительной скорости.

Выходным сигналом  $Y$  служат координаты центра тяжести судна  $G$  в географической системе координат  $Y = (x_G, y_G)^T$ .

Сеть реализует модель нелинейной авторегрессии с внешними входами (NARX — *nonlinear autoregressive with exogenous inputs model*), имеет по 14 единичных задержек по линии как входного, так и выходного сигнала. Сеть двухслойная. Первый слой имеет 15 нейронов с сигмоидальными функциями активации (в виде гиперболического тангенса), второй — два нейрона с тождественными функциями активации. Общий вид сети приведен на рисунке.



Общий вид архитектуры нейронной сети

Архитектура и назначение нейронной сети во многом определяют область поиска возможных алгоритмов для её обучения. По причине того, что рекуррентная сеть NARX может рассматриваться как многослойный персептрон [2], основным методом её обучения является *метод обратного распространения ошибки*. В связи с этим возникает вопрос: «Какой режим обучения (последовательный или пакетный) будет для обучения рассматриваемой сети более предпочтительным?». Сеть обучается на основе *a priori* полученных данных, и её настройка в режиме реального времени не предполагается. Объёма оперативной памяти вполне достаточно для хранения информации об обучении. Более того, при обучении в пакетном режиме точная оценка вектора градиента достигается, как правило, без введения дополнительных процедур его оценки [13]. Наконец, некоторые алгоритмы (например, способ Левенберга–Марквардта) имеют лишь пакетную форму своей реализации. Указанные обстоятельства свидетельствуют более в пользу пакетного режима, чем режима последовательного.

**Обзор основных алгоритмов обучения.** Исторически первым алгоритмом обучения многослойных нейронных сетей прямого распространения методом обратного распространения можно считать *дельта-правило* (BP — backpropagation), которое для пакетного режима записывается следующим образом:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \eta \mathbf{g}_k, \quad (1)$$

где  $\mathbf{w}$  — вектор свободных параметров сети (весов и пороговых значений) размерности  $P$ ;  $k$  — индекс итерации (эпохи);  $\eta$  — параметр скорости обучения;  $\mathbf{g}$  — вектор частных производных функции стоимости  $E(\mathbf{w})$  по свободным параметрам сети, определяющийся следующим выражением:

$$E(\mathbf{w}) = 0,5 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^2 e_{n,m}^2, \quad (2)$$

где  $n$  — индекс образца из общего их числа  $N$ ;  $m$  — индекс выходного нейрона;  $e_{n,m}$  — разность между прогнозируемым сетью значением сигнала  $n$  на  $m$ -м выходном нейроне и фактическим значением образца.

Вектор  $\mathbf{g}$  имеет следующий вид:  $\mathbf{g} = \left( \frac{\partial E}{\partial w_1}, \frac{\partial E}{\partial w_2}, \dots, \frac{\partial E}{\partial w_p} \right)$ . Процедура расчёта частных про-

изводных детально описана в [2], [13], [14].

Одной из основных проблем, возникающих при реализации классического алгоритма обратного распространения, является решение вопроса о выборе значения параметра  $\eta$ . Общеизвестных методик его определения в настоящее время не существует. Тем не менее, разработан ряд методик, позволяющих корректировать величину  $\eta$  на каждой итерации обучения. В среде MATLABR2013b реализован следующий алгоритм, который можно назвать адаптивным дельта правилом (ABP — adaptive back propagation). Выражение (1) сохраняет полностью свой вид для указанного алгоритма за исключением того, что величина параметра скорости обучения имеет индекс итерации  $k$ :

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \eta_k \mathbf{g}_k, \quad (3)$$

где  $\eta_k$  — адаптивный параметр скорости обучения, корректируемый в соответствии со следующей системой правил:

1) если от итерации к итерации значение функции стоимости  $E(\mathbf{w})$  увеличивается в количество раз, большее  $P_E = E_k / E_{k-1} > 1$ , то коэффициенты сети не корректируются, а значение скорости обучения уменьшается умножением на величину  $\lambda_d < 1$ ;

2) если от итерации к итерации значение функции стоимости  $E(\mathbf{w})$  не уменьшается, но увеличение происходит в количество раз, меньшее  $P_E = E_k / E_{k-1} > 1$ , то коэффициенты сети обновляются;

3) если от итерации к итерации значение функции стоимости  $E(\mathbf{w})$  уменьшается, то веса и пороги корректируются, а значение скорости обучения увеличивается умножением на величину  $\lambda_{in} > 1$ .

Конечно, описанный выше алгоритм адаптации параметра скорости обучения не является единственным. Широко известен, например, алгоритм *delta-delta* [14], в котором для каждого коэффициента сети на каждой итерации вычисляется свое значение параметра скорости обучения, учитывающее скорость изменения функции стоимости в направлении конкретного весового коэффициента. В работах [15], [16] предлагаются другие варианты настройки параметра скорости обучения.

Еще одним направлением модификации стандартного алгоритма ВР является добавление в его структуру инерционного члена  $\alpha$ , описанное в работах [1], [2], [14], для увеличения скорости обучения без потери устойчивости. При этом существует проблема поиска оптимальных значений уже двух констант обучения ( $\eta$  и  $\alpha$ ) при решении конкретной задачи обучения.

Особенностью обучения рекуррентных нейронных сетей является проблема обращения градиента в нуль [13], связанная с тем, что «устаревшие» сигналы, стоящие в конце на линиях задержек, оказывают слабое влияние на значение прогнозируемого сетью выходного сигнала. Одним из способов уменьшения указанного эффекта в рекуррентных сетях является использование методов оптимизации второго порядка. В основу данных методов положена квадратичная аппроксимация поверхности ошибок в окрестности текущей точки [2], позволяющая записать уравнение настройки коэффициентов сети следующим образом [17]:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - H_k^{-1} \mathbf{g}_k, \quad (4)$$

где  $H_k$  — матрица Гессе, содержащая вторые производные функции стоимости  $E(\mathbf{w})$ . Алгоритм коррекции (4) носит название *метода Ньютона*. Использование этого метода на практике затруднено в силу ряда причин. Во-первых, непосредственно процедура обращения матрицы  $H_k$  требует значительного объема вычислительных ресурсов. Во-вторых, по мере обучения нет гарантии, что обращение матрицы Гессе не будет представлять собой решение плохо обусловленной задачи, приводящее к усложнению вычислительного алгоритма. Наконец, если функция стоимости в окрестности текущей точки не является квадратичной, то гарантировать сходимость метода Ньютона невозможно.

Альтернативой методу Ньютона может служить способ *сопряженных градиентов*, при котором коррекция весовых коэффициентов осуществляется следующим образом:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \eta_k \mathbf{p}_k, \quad (5)$$

где величина  $\mathbf{p}_k = -\mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{p}_{k-1}$  определяет направление поиска. Параметр  $\eta_k$  определяется на каждой итерации с использованием процедуры линейного поиска (метод золотого сечения, метод Брента и др.). Для вычисления параметра  $\beta_k$  используются различные формулы, среди которых одной из наиболее удачных с позиции сходимости является формула Полака–Рибьера [2]:

$$\beta_k = \max \left\{ \frac{\mathbf{g}_k^T (\mathbf{g}_k - \mathbf{g}_{k-1})}{\mathbf{g}_{k-1}^T \mathbf{g}_{k-1}}, 0 \right\}.$$

Значения величины  $\mathbf{g}_k$  на каждой итерации  $k$  определяются на основе стандартного метода обратного распространения ошибки. Таким образом, рассматриваемый метод называется *методом сопряженных градиентов* на основе формулы Полака–Рибьера (*CGPR* — conjugate gradient Polak–Ribiere). Он содержит в себе, с одной стороны, свойства адаптивного метода обратного распространения и позволяет учитывать нелинейность функции стоимости в окрестности текущей точки — с другой. Причём эта нелинейность учитывается без непосредственного вычисления и обращения матрицы Гессе. Считается [2], что метод сопряжённых градиентов хорошо подходит для обучения многослойных сетей с большим количеством настраиваемых параметров, применяемых при решении задач аппроксимации функций, управления, регрессии.

Другим вариантом обхода затруднений, связанных с вычислением и обращением матрицы вторых производных, является использование *квазиньютоновских* методов. Уравнение обновления весов соответствует выражению (5), но направление поиска  $\mathbf{p}_k$ , в отличие от метода сопряжённых градиентов, уже определяется следующей формулой:

$$\mathbf{p}_k = -S_k \mathbf{g}_k, \quad (6)$$

где матрица  $S_k$  обновляется на каждой итерации по определённом алгоритму. Наиболее эффективным способом вычисления матрицы  $S_k$  считается в настоящее время [2] метод Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (*BFGS* — Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno), при котором матрица  $S_k$  вычисляется следующим образом [13]:

$$S_k = S_{k-1} + \frac{\Delta \mathbf{w}_k \Delta \mathbf{w}_k^T}{\mathbf{q}_k^T \mathbf{q}_k} - \frac{S_{k-1} \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^T S_{k-1}}{\mathbf{q}_k^T S_{k-1} \mathbf{q}_k} + [\mathbf{q}_k^T S_{k-1} \mathbf{q}_k][\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T],$$

$$\text{где } \mathbf{v}_k = \frac{\Delta \mathbf{w}_k}{\Delta \mathbf{w}_k^T \Delta \mathbf{w}_k} - \frac{S_{k-1} \mathbf{q}_k}{\mathbf{q}_k^T S_{k-1} \mathbf{q}_k},$$

а величины  $\mathbf{q}_k$  и  $\mathbf{w}_k$  определяются следующими выражениями:

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{g}_k - \mathbf{g}_{k-1}; \quad \Delta \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k - \mathbf{w}_{k-1}.$$

Для определения параметра скорости обучения  $\eta_k$ , так же, как и в методе сопряженных градиентов, используется линейный поиск. Другой вариант аппроксимации матрицы Гессе используется в методе Левенберга–Марквардта (*LM* — Levenberg–Marquardt) [17]:

$$H \approx J^T J + \mu I,$$

где  $I$  — единичная матрица;  $\mu$  — комбинационный коэффициент, а матрица Якоби  $J$  определяется следующим образом:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_p} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{N,1}}{\partial w_p} \\ \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{N,2}}{\partial w_p} \end{pmatrix}.$$

Для улучшения обобщающих свойств сети метод Левенберга–Марквардта нередко используется в комбинации со способом регуляризации Байеса (*LMBR* — Levenberg–Marquardt with Bayesian regularization). В работах [18], [19] приводятся примеры использования указанного метода. В алгоритме значение функции стоимости (целевой функции)  $F$  определяется следующим соотношением:

$$F = \beta E + \alpha E_w,$$

где  $E_w$  — сумма квадратов весовых коэффициентов сети;  $\alpha, \beta$  — параметры регуляризации, обновляемые после каждой итерации алгоритма Левенберга–Марквардта.

**Эксперимент.** Перейдем теперь к постановке компьютерного эксперимента по изучению сходимости различных алгоритмов обучения нейронной сети. Сделаем ряд предварительных замечаний. Эксперимент выполнялся в среде MATLAB R2013b, установленной на операционной системе Windows8, на компьютере с процессором Intel®Core™i7-4770K.

При обучении нейронной сети будем использовать две выборки: обучающую и тестовую, каждая из которых содержит 139700 образцов. Формирование первой описано в работе [10], второй — в работе [12]. Так как использовались генераторы случайных чисел, указанные выборки различаются.

В сравнительном исследовании участвуют следующие алгоритмы:

- адаптивный метод градиентного спуска (ABP);
- метод сопряжённых градиентов (CGPR);
- квазиньютоновский метод (BFGS);
- метод Левенберга–Марквардта (LM);
- метод Левенберга–Марквардта с регуляризацией Байеса (LMBR).

Начальное значение параметра скорости обучения  $\eta_{k=0}$  для метода ABP было получено путем перебора этого параметра для классического алгоритма BP, который для каждого рассматриваемого значения (0.1, 0.01, 0.001 ...  $1 \cdot 10^{-10}$ ) запускался по 10 раз. По критерию максимума модуля невязки на тестовой выборке было получено оптимальное значение  $\eta$ , равное 0.0000001. В качестве алгоритмов линейного поиска величины  $\eta_k$  использовались следующие методы: метод Чараламбу-са (method of Charalambous) для CGPR и метод поиска с возвратом (Backtracking method) для BFGS.

Сначала алгоритмы исследовались на сходимость при фиксированном числе итераций. Было рассмотрено 10, 50, 100, 150, 200, 250 и 300 итераций, для каждого количества которых обучение производилось по десять раз. На каждом этапе, соответствующем определенному значению итераций, фиксировались наибольшее  $s_{\max}$  и среднее  $s_{\text{mean}}$  значения максимума модуля невязки на обучающей и тестовой выборках, а также среднее время обучения. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обучение при фиксированном числе итераций

| Число<br>итераций | Алгоритм обучения                                              |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                   | ABP                                                            |                | CGPR           |                | BFGS           |                | LM             |                | LMBR           |                |
|                   | Наибольшее / (среднее) значения максимума модуля невязки, мили |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|                   | О                                                              | Т              | О              | Т              | О              | Т              | О              | Т              | О              | Т              |
| 10                | 4.45<br>(3.36)                                                 | 4.38<br>(3.18) | 3.65<br>(2.41) | 3.44<br>(2.26) | 5.46<br>(3.69) | 5.61<br>(3.48) | 3.72<br>(2.48) | 3.41<br>(2.16) | 1.78<br>(1.66) | 1.36<br>(0.42) |
| Время, с          | 89                                                             |                | 195            |                | 279            |                | 163            |                | 165            |                |
| 50                | 6.09<br>(3.04)                                                 | 4.70<br>(2.63) | 2.00<br>(1.75) | 1.65<br>(1.28) | 5.24<br>(3.13) | 4.25<br>(2.97) | 3.78<br>(2.20) | 3.58<br>(1.71) | 1.92<br>(1.62) | 1.27<br>(0.75) |
| Время, с          | 455                                                            |                | 953            |                | 1456           |                | 762            |                | 769            |                |
| 100               | 4.58<br>(2.51)                                                 | 4.71<br>(2.31) | 1.92<br>(1.76) | 1.56<br>(0.89) | 4.10<br>(2.47) | 3.74<br>(2.52) | 2.26<br>(1.76) | 1.75<br>(0.82) | 1.80<br>(1.56) | 1.75<br>(0.48) |
| Время, с          | 883                                                            |                | 1956           |                | 3005           |                | 1506           |                | 1533           |                |
| 150               | 2.59<br>(2.04)                                                 | 2.58<br>(1.82) | 1.90<br>(1.74) | 1.39<br>(0.61) | 2.74<br>(2.17) | 2.87<br>(1.67) | 3.20<br>(1.72) | 3.22<br>(1.09) | 1.75<br>(1.20) | 1.39<br>(0.55) |
| Время, с          | 1348                                                           |                | 2984           |                | 4523           |                | 2250           |                | 2290           |                |
| 200               | 2.68<br>(2.1)                                                  | 2.90<br>(1.49) | 2.14<br>(1.77) | 1.84<br>(0.70) | 2.18<br>(1.88) | 2.91<br>(1.91) | 1.91<br>(1.61) | 1.77<br>(0.93) | 1.86<br>(1.10) | 1.04<br>(0.52) |
| Время, с          | 1810                                                           |                | 3808           |                | 6005           |                | 3002           |                | 3069           |                |
| 250               | 2.14<br>(1.92)                                                 | 2.10<br>(1.45) | 2.16<br>(1.90) | 1.06<br>(0.59) | 2.97<br>(2.03) | 2.19<br>(1.48) | 1.92<br>(1.52) | 3.34<br>(1.22) | 2.07<br>(0.77) | 0.86<br>(0.50) |
| Время, с          | 2253                                                           |                | 4828           |                | 7512           |                | 3758           |                | 3808           |                |
| 300               | 2.42<br>(1.95)                                                 | 2.13<br>(1.49) | 3.07<br>(1.87) | 1.63<br>(0.65) | 2.49<br>(1.98) | 2.63<br>(1.48) | 1.82<br>(1.32) | 1.77<br>(0.76) | 1.07<br>(0.72) | 1.71<br>(0.84) |
| Время, с          | 2702                                                           |                | 5689           |                | 9058           |                | 4549           |                | 4577           |                |

Примечание. Буква «О» относится к образцам обучающей выборки, «Т» — тестовой. В графе «Время» указано среднее время обучения.

Как видно из данной таблицы, по прошествии определённого количества эпох разные алгоритмы обучения имеют различную точность на тестирующей выборке. Меньшая величина  $c_{\max}$  на образцах из данной выборки соответствует лучшему алгоритму обучения при заданном числе итераций. Теперь возникает следующий вопрос: «Какой алгоритм можно считать наиболее подходящим для решения рассматриваемой задачи обучения?» Оптимальным будем считать тот метод обучения, который демонстрирует лучшие по предельной точности (величине  $c_{\max}$ ) результаты на тестирующей выборке в *большинстве* рассмотренных случаев. Каждый случай соответствует обучению с заданным числом итераций. С этой точки зрения оптимальным алгоритмом обучения является способ Левенберга–Марквардта в сочетании со способом регуляризации Байеса (LMBR).

Подобный подход к определению оптимального алгоритма обучения можно было бы считать совершенным, если бы все рассматриваемые алгоритмы имели одинаковое время выполнения одной итерации. Например, для пятидесятой итерации (см. табл. 1), наиболее точным оказался метод Левенберга–Марквардта на основе регуляризации Байеса (LMBR), и для прохода этих пятидесяти итераций в среднем требуется 769 с. Классический градиентный метод (ABP) оказался наименее точным, но самым быстрым (среднее время пятидесяти итераций 455 с). Т. е. метод ABP имеет практически двойной запас по времени по сравнению с алгоритмом LMBR. Возникает предположение, что за это время ABP может достичь точности, не худшей, а может быть, даже лучшей, чем LMBR. В связи с этим было принято решение повторить эксперимент, зафиксировав уже не число итераций, а *время* обучения. В качестве времени обучения на каждом итерационном этапе было выбрано среднее время обучения самого точного алгоритма для соответствующего числа итераций. На каждом временном этапе обучение выполняется также по 10 раз. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Обучение при фиксированном времени**

| Время<br>обучения, с | Алгоритм обучения                                              |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | ABP                                                            |                | CGPR           |                | BFGS           |                | LM             |                | LMBR           |                |
|                      | Наибольшее / (среднее) значения максимума модуля невязки, мили |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|                      | О                                                              | Т              | О              | Т              | О              | Т              | О              | Т              | О              | Т              |
| 165                  | 4.44<br>(3.17)                                                 | 4.28<br>(2.97) | 5.44<br>(2.71) | 4.07<br>(2.34) | 6.44<br>(4.25) | 6.06<br>(3.94) | 3.92<br>(2.60) | 3.66<br>(2.14) | 1.78<br>(1.62) | 1.36<br>(0.49) |
| Число ит.            | 20                                                             |                | 9              |                | 6              |                | 11             |                | 10             |                |
| 769                  | 5.92<br>(2.91)                                                 | 4.27<br>(2.53) | 2.06<br>(1.87) | 1.81<br>(1.04) | 3.38<br>(2.95) | 3.23<br>(2.64) | 4.53<br>(2.22) | 4.17<br>(1.41) | 1.92<br>(1.55) | 1.61<br>(0.82) |
| Число ит.            | 91                                                             |                | 39             |                | 27             |                | 51             |                | 50             |                |
| 1956                 | 3.67<br>(2.14)                                                 | 3.74<br>(1.81) | 2.15<br>(1.69) | 1.32<br>(0.69) | 4.24<br>(2.67) | 4.28<br>(2.39) | 1.95<br>(1.72) | 1.60<br>(0.79) | 1.95<br>(1.30) | 1.61<br>(0.52) |
| Число ит.            | 222                                                            |                | 100            |                | 66             |                | 131            |                | 129            |                |
| 2290                 | 2.23<br>(1.99)                                                 | 2.20<br>(1.35) | 1.86<br>(1.62) | 1.03<br>(0.62) | 3.09<br>(2.40) | 3.66<br>(2.39) | 1.85<br>(1.51) | 2.01<br>(0.87) | 1.75<br>(1.15) | 1.40<br>(0.59) |
| Число ит.            | 258                                                            |                | 117            |                | 76             |                | 154            |                | 152            |                |
| 3069                 | 2.55<br>(1.96)                                                 | 2.21<br>(1.23) | 2.84<br>(1.84) | 1.44<br>(0.69) | 2.28<br>(2.11) | 2.81<br>(2.00) | 2.06<br>(1.62) | 1.49<br>(0.85) | 1.93<br>(1.15) | 1.15<br>(0.53) |
| Число ит.            | 346                                                            |                | 157            |                | 102            |                | 206            |                | 204            |                |
| 3808                 | 2.77<br>(1.97)                                                 | 2.07<br>(1.38) | 2.80<br>(1.67) | 1.43<br>(0.73) | 3.17<br>(2.18) | 2.35<br>(1.78) | 1.92<br>(1.31) | 2.87<br>(0.82) | 2.07<br>(0.86) | 0.86<br>(0.55) |
| Число ит.            | 430                                                            |                | 198            |                | 126            |                | 255            |                | 254            |                |
| 5689                 | 2.08<br>(1.90)                                                 | 1.97<br>(1.35) | 2.79<br>(1.91) | 2.48<br>(1.00) | 2.20<br>(1.94) | 2.40<br>(1.57) | 1.79<br>(1.15) | 1.66<br>(0.88) | 0.99<br>(0.45) | 1.71<br>(0.80) |
| Число ит.            | 641                                                            |                | 306            |                | 192            |                | 379            |                | 381            |                |

*Примечание.* Буква «О» относится к образцам обучающей выборки, «Т» — тестовой. «Число ит.» — среднее число итераций.

Как видно из табл. 2, наибольшую точность при фиксированном времени обучения имеет на большинстве временных этапов алгоритм LMBR, как это было и в предыдущем эксперименте с фиксированным числом итераций. Таким образом, данный алгоритм имеет наилучшие показатели по сходимости (величине  $c_{\max}$ ) в обоих экспериментах. На втором месте стоит метод сопряжённых градиентов (CGPR), на третьем — метод Левенберга–Марквардта (LM). Таковы основные результаты выбора оптимального (по скорости сходимости) алгоритма обучения нейронной сети, прогнозирующей счислимы координаты судна по известным значениям его кинематических параметров. В пользу алгоритма Левенберга–Марквардта как одного из самых эффективных методов обучения нейронных сетей говорят и результаты исследований [17], [20].

Конечно, предлагаемая методика выбора оптимального алгоритма имеет определённые недочёты. Так, если сравнить число итераций наиболее точного алгоритма (см. табл. 1), по которому задаётся время обучения (см. табл. 2), со средним числом итераций (выделено курсивом в табл. 2), то заметно, что это их среднее значение в ряде случаев не совпадает с заданным числом из табл. 1. Погрешность не превышает 2 % от ожидаемого значения, но всё-таки говорит о некоторой нестабильности быстродействия вычислительной системы. Другой пример нестабильности следует из того, что алгоритм LM, имеющий среднее время одной итерации чуть меньшее, чем LMBR, успел в среднем пройти на две итерации меньше, чем LMBR на последнем временном этапе (см. табл. 2). Нестабильность может быть вызвана процессами, в различном количестве выполняющимися в разное время в операционной системе, температурой помещения, в которой установлен компьютер, и другими подобными программно-аппаратными эффектами.

Алгоритмом, имеющим наименьшее время выполнения одной итерации, справедливо оказался метод АБР, наибольшее — квазиньютоновский BFGS, повышенная вычислительная сложность которого (по сравнению с методами сопряжённых градиентов) отмечается в работах [2], [13]. Среднее время одной итерации алгоритма BFGS превышает таковое для CGPR в среднем на 53 %.

### Заключение

Рассмотрена методика определения оптимального по точности (сходимости) алгоритма обучения нейронной сети, прогнозирующей координаты места судна по известным кинематическим параметрам. Данная методика основана на анализе точности прогноза траектории судна, обученной при помощи различных алгоритмов при фиксированном времени обучения. Методика включает два этапа. На первом этапе определяется оптимальный алгоритм обучения при фиксированных значениях числа итераций. Данные значения задаются дискретно с определённым шагом. На втором этапе фиксируется время обучения, устанавливаемое по среднему времени работы оптимального алгоритма (определённого на первом этапе) для каждого рассматриваемого числа итераций. Показателем точности выбирается наибольшее значение максимума модуля невязки в модельных ситуациях на образцах из тестовой выборки. Оптимальным по точности алгоритмом, определённым по указанной методике, оказался метод Левенберга–Марквардта в комбинации со способом регуляризации Байеса. Отбор алгоритмов, участвующих в сравнении, был сделан с учётом практики использования нейронных сетей для решения задач, связанных с моделированием динамики подвижных объектов. Дальнейшие исследования по разработке и тестированию алгоритмов обучения могут лежать в области изучения влияния количества свободных параметров сети и образцов на скорость сходимости процесса обучения, а также построения алгоритмов, учитывающих конкретный вид поверхности ошибок применительно к решаемой задаче счисления пути. Отдельного внимания заслуживают также вопросы разработки специализированных функций стоимости (целевых функций), отвечающих решению конкретных навигационных задач судовождения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей: пер. с англ. / Р. Каллан. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. — 288 с.

2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс; пер. с англ. Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестова / С. Хайкин. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
3. Ведякова А. О. Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей / А. О. Ведякова // International Journal of Open Information Technologies. — 2014. — Т. 2. — № 3. — С. 18–22.
4. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation / A. Ebada. — Germany: Institute of Ship Technology und Transport Systems, 2007. — 156 p.
5. Moreira L. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks / L. Moreira, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. — 2003. — Vol. 30. — Pp. 1669–1697. DOI:10.1016/S0029-8018(02)00147-6.
6. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
7. Nguyen-H. M. Improving GPS/INS Integration through Neural Networks / M. Nguyen-H, C. Zhou // Journal of Telecommunications. — 2010. — Vol.2. — Is. 2. — Pp. 1–6.
8. Xu T. A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm / T. Xu, X. Liu, X. Yang // Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS). — 2012. — Vol. 4. — No. 11. — Pp. 271–277. DOI: 10.4156/AISS.vol4.issue11.33.
9. Дерябин В. В. Нейросетевые системы прогноза скорости дрейфа судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 7–14.
10. Дерябин В. В. Нейросетевой метод прогноза счислимых координат места судна / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 6. — С. 92–96.
11. Дерябин В. В. Прогноз счислимых координат судна на основе нейронных сетей / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2015. — № 4. — С. 159–165.
12. Дерябин В. В. Системы счисления пути судна на основе нейронных сетей / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2015. — № 5. — С. 137–142.
13. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. — Third Edition. — New York: Prentice Hall, 2009. — 937 p.
14. Аникеев М. В. Обзор современных типов нейронных сетей / М. В. Аникеев, Л. К. Бабенко, О. Б. Макаревич // Радиоэлектроника, информатика, управление. — 2001. — № 1. — С. 48–56.
15. Mammadov M. An Improved Version of Backpropagation Algorithm with Effective Dynamic Learning Rate and Momentum / M. Mammadov, E. Tas // Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Istanbul, Turkey, May 27 – 29. Turkey, 2006. — Pp. 356–361.
16. Subavathi S. J. Adaptive modified backpropagation algorithm based on differential errors // S. J. Subavathi, T. Kathirvalavakumar // International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA). — 2011. — Vol. 1. — No. 5. — Pp. 21–34. DOI: 10.5121/ijcsea.2011.1503.
17. Yu H. Advanced Learning Algorithms of Neural Networks: Ph. D. dissertation / H. Yu. — USA: Graduate Faculty of Auburn University, 2011. — 130 p.
18. Foresee F. D. Gauss-Newton Approximation to Bayesian Learning / F. D. Foresee, M. T. Hagan // Neural Networks, 1997, International Conference on. — Houston, TX: IEEE, 1997. — Vol. 3. — Pp. 1930–1935. DOI: 10.1109/ICNN.1997.614194.
19. MacKay D. J. C. Bayesian Interpolation / D. J. C. MacKay // Neural Computation. — 1992. — Vol. 4. — No. 3. — Pp. 415–447. DOI:10.1162/neco.1992.4.3.415.
20. Седова Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления судном по курсу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Н. А. Седова. — Владивосток, 2009. — 22 с.

## TRAINING ALGORITHMS OF NEURAL NETWORK BASED VESSEL'S DEAD RECKONING SYSTEM

*Methodology of optimal precision (convergence) neural network training algorithm determination is considered. Neural network predicts vessel's dead reckoning coordinates. The method based on several algorithms' performance comparison includes two phases. At the first phase optimal training algorithm is determined with*

fixed number of iterations. For each of considered iteration number the training is performed ten times, and neural network track prediction precision characteristics are determined. For each number of epochs mean training time for most precise algorithm is registered. This time is used at the second phase, being defined the same for all algorithms considered. They are also performed ten times. For each set time of training value the most precise algorithm is determined. Algorithm, which demonstrates the best accuracy for the majority of time moments, is to be considered as optimal. At all stages the main accuracy criteria is maximum of ten values of track error maximum modules on test set.

Keywords: neural network, vessel's dead reckoning, training algorithm, testing, coordinates

## REFERENCES

1. Kallan, Robert. *Osnovniye konseptsii neyronnyih setey*. M.: Williams publishing, 2003.
2. Haykin, Symon. *Neuronnye seti: polniy kurs*. M.: Williams publishing, 2006.
3. Vediakova, A. O. "Neural network approach for identification under external disturbance." *International Journal of Open Information Technologies* 2.3 (2014): 18–22.
4. Ebada, Adel. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation. Germany: Institute of Ship Technology und Transport Systems, 2007.
5. Moreira L., and C. Guedes Soares. "Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks." *Ocean Engineering* 30.13 (2003): 1669–1697. DOI:10.1016/S0029-8018(02)00147-6.
6. Sazonov, A. E., and V. V. Deryabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
7. Nguyen-H, Mathieu, and Chi Zhou. "Improving GPS/INS Integration through Neural Networks." *Journal of Telecommunications* 2.2 (2010): 1–6.
8. Xu, T., X. Liu, and X. Yang. "A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm." *Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS)* 4.11 (2012): 271–277. DOI: 10.4156/AISS.vol4.issue11.33.
9. Deryabin, V. V. "Neural network based vessel's speed of drift prediction systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 7–14.
10. Deryabin, V. V. "Neural network method of vessel's dead reckoning position prediction." *Transport business in Russia* 6 (2014): 92–96.
11. Deryabin, V. V. "Vessel's dead reckoning track prediction on basis of neural networks." *Transport business in Russia* 4 (2015): 159–165.
12. Deryabin, V. V. "Vessel's dead reckoning systems on basis of neural networks." *Transport business in Russia* 5 (2015): 137–142.
13. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2009.
14. Anikeev, M. B., L. K. Babenko, and O. B. Makarevich. "Obzor sovremennyih tipov neyronnyih setey." *Radioelektronika, informatika, upravlenie* 1 (2001): 48–56.
15. Mammadov, M., and E. Tas. "An Improved Version of Backpropagation Algorithm with Effective Dynamic Learning Rate and Momentum." *Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Istanbul, Turkey, May 27-29. Turkey, 2006*: 356–361.
16. Subavathi, S. J., and T. Kathirvalavakumar. "Adaptive modified backpropagation algorithm based on differential errors." *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCEA)* 1.5 (2011): 21–34. DOI: 10.5121/ijcsea.2011.1503.
17. Yu, Hao. *Advanced Learning Algorithms of Neural Networks*: Ph.D. dissertation. USA: Graduate Faculty of Auburn University, 2011.
18. Foresee, F. Dan, and Martin T. Hagan. "Gauss-Newton approximation to Bayesian learning." *Neural Networks, 1997. International Conference on*. Vol. 3. IEEE, 1997: 1930–1935. DOI: 10.1109/ICNN.1997.614194.
19. MacKay, David J. C. "Bayesian Interpolation." *Neural Computation* 4.3 (1992): 415–447. DOI:10.1162/neco.1992.4.3.415.

20. Sedova, N. A. *Intellektualnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya sudnom po kursu: Abstract of PhD dissertation (Tech.)*. Vladivostok: Admiral Nevelskoy Maritime State University, 2009.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

Дерябин Виктор Владимирович —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
gmavitder@mail.ru, kaf\_nav@gumrf.ru

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

Deryabin Victor Vladimirovich —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
gmavitder@mail.ru, kaf\_nav@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 11 апреля 2016 г.*

**УДК 656.61**

**Т. Е. Маликова,  
А. А. Янченко**

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО  
ИНФОРМИРОВАНИЯ ТАМОЖЕННЫХ ОРГАНОВ  
ПРИ МОРСКИХ ВНЕПЛАНОВЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ**

*В статье рассмотрен процесс формирования информационного потока при внеплановых перевозках с целью определения необходимых условий для реализации технологии предварительного информирования таможенных органов на морском транспорте. В ходе исследования был выполнен структурный анализ процесса формирования импортного грузопотока при внеплановых перевозках. В результате выполненного исследования доказано, что механизм предоставления предварительной информации в отношении товаров, перемещаемых морским транспортом, разработан без учета специфических особенностей формирования грузопотока при внеплановых перевозках. Выявленные особенности технологического процесса формирования грузопотоков при внеплановых перевозках позволили выделить несколько вариантов развития событий, при наступлении которых предварительная информация от перевозчика и грузоотправителя либо не может быть сформирована, либо становится недостоверной, в результате чего судно не оформляется по технологии предварительного информирования. Для устранения выявленных проблем предложены мероприятия по изменению технологии предварительного информирования таможенных органов на морском транспорте.*

*Ключевые слова: контейнер, судно, перевозчик, морские перевозки, предварительная информация, таможенные органы.*

**Введение**

В целях повышения пропускной способности морского порта за счет ускорения совершения таможенных операций в отношении морских судов и грузов ведутся исследования, направленные на разработку единого технологического процесса (ЕТП) взаимодействия всех участников транспортного рынка. В статье [1] изложены результаты натурного эксперимента по внедрению ЕТП в деятельность ОАО «Владивостокский морской торговый порт». В ходе экспериментальных исследований был сделан вывод о том, что существенное влияние на скорость движения контейнерного потока оказывает организация электронного документооборота в морском пункте пропуска с применением предварительного информирования контролирующих органов, прежде всего таможенных [2] – [4]. Предварительное информирование предусматривает выбор объектов таможенного контроля до фактического прибытия судна в порт [1], что позволяет сократить сроки пребывания грузов в порту под таможенным контролем и, таким образом, повысить пропускную способность терминалов порта. В результате применения данной технологии произошло сокращение срока фактического пребывания контейнера в морском порту Владивосток на 4,5 сут. Следует отме-

тить, что особенности применения технологии электронного документооборота в морских пунктах пропуска и направления повышения пропускной способности портовых контейнерных терминалов раскрыты в статьях [5], [6], но предварительное информирование, как одно из направлений совершенствования, в этих источниках не указано.

В ходе проводимого эксперимента на базе таможенных постов Морской порт Владивосток и Морской порт Восточный были апробированы на практике общие подходы к созданию технологии получения предварительной информации из двух источников: от морского перевозчика и от заинтересованных лиц (получатель, отправитель и т. д.), а также схемы обработки предварительной информации в рамках системы управления рисками.

Предварительная информация от заинтересованных лиц (формат ПИТ1) включает, согласно данным источника [7], следующие сведения: о лицах, перемещающих товары и выступающих инициаторами перемещения (отправителе, получателе, экспедиторах, агентах и др.); о товарах (наименование товаров их фактурная стоимость, количество грузовых мест, их маркировка и виды упаковок товаров, вес брутто товаров, либо объем товаров, классификационный код товаров по ТНВЭД); о товаросопроводительных, транспортных и иных документах (сведения о внешнеэкономической сделке и ее основных условиях); а также иную информацию (наименование страны отправления и страны назначения товаров, страны происхождения товаров, заявленная таможенная процедура и др.). После проведения таможенными органами форматно-логического контроля информации, указанной в ПИТ1, соответствующей контейнерной партии присваивается уникальный идентификационный номер — УИН ПИТ1.

Предварительная информация от перевозчика (формат — ПИТ2) содержит, согласно данным источника [7], следующие документы и сведения: общую декларацию; декларации о грузе и о судовых припасах; судовую роль; список пассажиров; транспортные (перевозочные) документы; сведения о судозаходах; имеющиеся у перевозчика коммерческие документы на перевозимые товары, сведения о товаре и количестве грузовых мест, номера коносаментов или иных документов, подтверждающих наличие и содержание договора морской перевозки на товары, подлежащие выгрузке в этом порту, и др. Кроме того, в ПИТ2 указываются УИН ПИТ1, присвоенные контейнерам, после форматно-логического контроля ПИТ1. После проведения форматно-логического контроля информации, поданной в форме ПИТ2, принимается решение об оформлении судна по технологии предварительного информирования. Полученная информация регистрируется в таможенном органе и ей присваивается уникальный идентификационный номер — УИН ПИТ2.

Следует отметить, что в деятельности таможенных постов сложилась практика, что если хотя бы для одного контейнера, прибывшего на данном судне, отсутствует информация по форме ПИТ1 (УИН ПИТ1 не присвоен), то считается, что информация по ПИТ2 неполная и судно по технологии предварительного информирования не оформляется.

### Основная часть

Начиная с 2013 г. в рамках проводимого эксперимента технологию предварительного информирования контролирующих органов применяют в своей деятельности все судоходные компании, осуществляющие судозаходы в морские порты Владивосток, Находка и Восточный. Однако опыт применения разработанного механизма предоставления предварительной информации на базе Корсаковского и Холмского таможенных постов, где оформляется подавляющее количество грузов, следующих на Сахалин морским транспортом, неожиданно дал отрицательный результат. Эти факты отмечены в статьях [8], [9]. Так, в 2012 г. доля применения технологии предварительного информирования в общем объеме информационного потока Сахалинской таможни составила 12,8 %, в 2013 г. — 11,9 %, в 2014 г. снизилась до 10,8 %. В 2014 г. процентный показатель, характеризующий деятельность сахалинской таможни по созданию благоприятных условий развития внешнеторговой деятельности, составил всего 12 %.

Одной из причин отсутствия положительного эффекта от внедрения предварительного информирования в сахалинской таможне, по мнению авторов, является то, что при разработке меха-

низма предоставления предварительной информации не была учтена специфика региона деятельности таможенного органа. В отличие от владивостокской и находкинской таможни, в структуре импорта сахалинской таможни преобладают поставки товаров мелкими партиями, и основные товаропотоки следуют из стран Азиатско-Тихоокеанского региона [8]. Кроме того, регион деятельности сахалинской таможни имеет следующие особенности:

- регионом деятельности является Сахалинская область — единственная в России островная административная территория;
- морское сообщение — основной способ осуществления внешнеэкономической деятельности;
- различные погодные и навигационные условия портов в регионе деятельности;
- преобладание внеплановых перевозок грузов в общей структуре морских перевозок;
- основным назначением транспортного комплекса является обеспечение производственных, внутриобластных и межрегиональных связей, сферы обращения товаров и услуг, удовлетворение потребностей населения в перемещении.

Таким образом, существуют определенные объективные причины, по которым участники ВЭД мало используют технологию предварительного информирования при перемещении товаров и транспортных средств через морские пункты пропуска в зоне деятельности Сахалинской таможни. В частности, можно сделать предположение о том, что механизмы предоставления предварительной информации в электронной форме в отношении товаров, перемещаемых морским транспортом, разработаны без учета специфики формирования грузопотоков. Для подтверждения или опровержения данной гипотезы методом структурного анализа были исследованы процессы формирования импортных грузопотоков на предмет выявления отличительных особенностей технологического процесса сбора и предоставления предварительной информации от перевозчика в контролирующие органы.

Исследования проводятся в три этапа.

Задача первого этапа — исследовать процесс зарождения и формирования информационного потока, предназначенного для таможенных целей при плановых перевозках грузов. Результаты этого исследования были опубликованы в статье [10].

Задача второго этапа — исследовать процесс зарождения и формирования информационного потока, предназначенного для таможенных целей при внеплановых перевозках.

Задача третьего этапа — проанализировать возникновение рисков в процессе предоставления предварительной информации от перевозчика контролирующим органам и разработать предпосылки для их снижения. Некоторые результаты этого этапа опубликованы в статьях [8], [10].

В данной статье рассмотрен второй этап выполненного авторами исследования, а именно исследование процесса формирования импортных грузопотоков при внеплановых перевозках. Особенностью данного вида перевозок является то, что суда в конкретном регионе работают нерегулярно и совершают рейсы только в тех направлениях и между теми портами, где на них возникает спрос, в каждом конкретном случае заключается договор фрахтования — *чартер*. Перевозка осуществляется на неспециализированных судах. В чартере оговариваются условия фрахтового контракта, которые зависят не только от его формы (*проформы*), а также условий, оговоренных и внесенных в *аддендумы*. Именно последние условия могут усложнить процесс подачи предварительной информации в контролирующие органы. Так, при указании в чартере маршрута направления судна для выгрузки в виде *рейнджа* или *опциона рейнджей* подача ПИТ2 перевозчиком возможна только при приходе в ордерную точку или на ордерную позицию. Также в чартере оговариваются условия «*мертвого*» *фрахта*. Если фрахтователь не предъявит к погрузке всего количества груза, судовладелец может принять для перевозки дополнительный груз (по сверхсрочным и спот-промптовым ордерам), заключив договор краткой формы (*берс-нот*). В результате могут появиться дополнительные порты захода для принятия дополнительного груза, и информация по всем контейнерам в формате ПИТ1 с присвоенными идентификационными номерами поступит перевозчику только после погрузки в этом порту захода.

Таким образом, предварительная информация по формам ПИТ1 и ПИТ2 формируется в течение всего процесса подготовки груза к перевозке, его погрузки на судно и транспортировки его до места назначения. При этом необходимо учесть следующие особенности рассматриваемого транспортного процесса:

- погрузка груза осуществляется в иностранном порту,
- в процессе транспортировки возможен вариант дополнительного судозахода в иностранный порт для дозагрузки судна,
- конечным пунктом прибытия является российский порт, перед этим возможен заход судна в ордерную точку.

Выполненный структурный анализ процесса формирования грузопотока при внеплановых перевозках показал, что условно процесс можно разделить на четыре этапа.

**1-й этап — операции, связанные с формированием контейнерных партий грузов, подлежащих перевозке морским транспортом в иностранном порту.**

При необходимости внеплановых перевозок (или невозможности плановых) грузовладельцы (или их экспедиторы) самостоятельно заключают договоры фрахтования с судовладельцами на перевозку груза на основе различных форм фрахтового контракта (рейсовый чартер, тайм-чартер, бербоут-чартер и т. п.). Также для перевозки крупной партии груза или организации перевозки мелких партий может быть заключен договор с агентскими или аквизиторскими компаниями (компаниями, которые занимаются организацией отправок мелких партий, а также загруженных самими отправителями контейнеров). После заключения данных договоров груз доставляется в порт.

Последовательность операций по формированию контейнерных партий грузов представлена на рис. 1. Для обработки груза в порту отправления заключаются договоры терминального обслуживания на осуществление тех транспортно-экспедиторских услуг, которые надлежит выполнить (хранение груза в порту, консолидация груза, стивидорское, тальманское обслуживание и т. п.).



Рис. 1. Процесс формирования контейнерных партий грузов

Условные обозначения: ————— — материальный поток; - - - - - — информационный поток

Грузы различных владельцев доставляются в порт на терминал, указанный в договоре. В случае прибытия партий грузов, требующих консолидации, осуществляется их укладка в контейнер либо формируются из мелких партий «сборные контейнеры» для отправки в один пункт назначения. Размещение и крепление груза в контейнере осуществляется согласно установленных правил под контролем грузоотправителя (или его экспедитора) и сюрвейера. По завершению данного процесса на каждый контейнер накладываются пломбы запорно-пломбировочного устройства. При осуществлении крупных перевозок груза, в том числе при фрахтовании судна для перевозки груза одного грузовладельца, возможна доставка в порт уже сформированных контейнерных партий.

Вся информация о составе контейнеров отражена в упаковочных листах, которые содержат сведения о расположении грузовых мест с указанием отправителя и получателя, номерах коносаментов или накладных по каждой товарной партии и спецификации груза. Также формируются другие перевозочные документы (например, весовой сертификат, свидетельствующий о весе груза в контейнере, контейнерный коносамент, в котором указываются номер контейнера, его тип и масса, наименование груза, оттиски пломб и др.). В случае доставки на терминал порта сформированных контейнерных партий груза все товаросопроводительные и перевозочные документы передаются грузоотправителем перевозчику по прибытии контейнеров.

Грузоотправителем или его экспедитором подписывается погрузочный ордер (*Shipping Order*), в котором содержатся сведения о наименовании отправителя и месте его нахождения, наименовании порта выгрузки, наименовании получателя, наименовании и характеристиках груза (числе мест, массе, количестве), информация о внешнем состоянии груза и упаковки, а также информация о ИНН, коде ТНВЭД и др.

Обязательными на данном этапе являются операции, связанные с прохождением таможенных формальностей в иностранном порту погрузки. Получение разрешения на отправление груза со стороны таможенных органов отмечается проставлением таможенной штампа «Выпуск разрешен» в одном из экземпляров погрузочного ордера (*Shipping Order*). Сформированные контейнерные партии находятся в порту до прибытия судна, зафрахтованного грузовладельцем или агентской компании для его перевозки. Таким образом, из ранее изложенного можно сделать вывод о том, что на данном этапе предварительная информация о доставляемом грузе (ПИТ1) полностью известна и может быть отправлена государственным контролирующим (в первую очередь, таможенным) органам порта назначения.

Следует отметить, что в процессе формирования контейнерных партий по договору чартера могут возникнуть проблемы, связанные с нарушением сроков доставки груза в порт, изменением количества груза, доставленного в порт или с отказом в выпуске груза таможенными и / или иными контролирующими органами порта отправления. Таким образом, количество груза, фактически предъявленного к перевозке, может быть меньше грузоместимости судна, заявленной в чартере. Кроме того, следует отметить, что на данном этапе предварительная информация о грузе в контейнерах (ПИТ1), подготовленных к перевозке на зафрахтованном судне, сформирована только на те контейнерные партии, для которых грузоотправителями подготовлен и отправлен в таможенные органы порта прибытия по процедуре предварительного информирования полный пакет товаросопроводительных документов, и только этим контейнерам будет присвоен в дальнейшем УИН ПИТ1.

## **2-й этап — операции предварительного осмотра контейнеров перед погрузкой (рис. 2).**

По прибытии судна в порт (или на рейд) перевозчик информирует грузоотправителя, своего агента и службы порта о прибытии и подает нотис о готовности к грузовым операциям. В нотисе о готовности указывается количество груза, предназначенного к перевозке согласно условий чартер-партии, которое будет принято на борт судна. При этом может быть указано фиксированное количество груза либо его минимальное и / или максимальное значение, в том числе в процентном отношении к фиксированному количеству, в пределах грузоместимости и грузоподъемности судна. Указанное количество в дальнейшем будет влиять на возникновение права судовладельца

на «мертвый» фрахт. Так, если в чартере в опционе фрахтователя указано «минимальное количество груза, предоставляемого к перевозке до полной грузоподъемности и грузоместимости», то в случае предоставления фрахтователем количества груза менее заявленного капитаном нижнего предела у судовладельца возникает право на «мертвый фрахт».



Рис. 2. Процесс предварительного осмотра грузов перед погрузкой  
Условные обозначения: ————— — материальный поток; - - - - - — информационный поток

До начала стальнойной времени контейнеры, подготовленные к перевозке, укладывают в штабеля на причале. Перед погрузкой контейнеров на борт судна представителем перевозчика (судовым агентом) в обязательном порядке осуществляется осмотр предназначенного к погрузке груза согласно погрузочному ордеру (*Shipping Order*). В случае выявления каких-либо нарушений целостности пломб, повреждения контейнера и других подобных нарушений судовой агент письменно (с составлением письма-протеста) информирует грузоотправителя о замечаниях по состоянию контейнеров и о намерении внести оговорки в оригиналы коносаментов. До урегулирования данного вопроса погрузка данных контейнеров на борт не осуществляется.

Кроме того, на данном этапе возникают риски, связанные с принятием решения капитаном или судовым агентом о невозможности погрузки контейнера на борт судна ввиду неисправности тары (контейнера), запорно-пломбировочных устройств, отсутствия или нечеткости маркировки и других проблем, выявленных при наружном осмотре. При сверке представленного количества груза в контейнерах к погрузке с заявленным в нотисе о готовности может возникнуть ситуация с «мертвым фрахтом», одним из решений которой является привлечение дополнительного груза, предварительная информация по форме ПИТ1 на который не формировалась. Таким образом, этот этап можно определить как предварительный контроль и корректировку информации по форме ПИТ1, передачу информации в таможенные органы порта прибытия для прохождения форматно-логического контроля. Также на данном этапе начинает накапливаться информация по форме ПИТ2 от перевозчика.

### 3-й этап — операции по принятию контейнеров на борт судна (рис. 3).

Погрузочные работы и укладка контейнеров на судне осуществляются под руководством стивидоров согласно грузовому плану, составляемому заблаговременно на основании данных чартеров. Если судно принимает к перевозке несколько различных партий груза (каждая перевозка оформляется отдельно — *partcargo*), то судовой агент определяет ротацию груза исходя из общих интересов рейса. При погрузке для соблюдения мер безопасности по размещению груза на борту судна принимаются во внимание данные весовых сертификатов.

Загрузка судна осуществляется согласно международным и национальным правилам, касающимся правил приема и перевозки грузов с учетом особенностей предстоящего рейса. В случае прибытия предназначенных для перевозки контейнеров с опозданием в каждом индивидуальном случае рассматривается возможность погрузки данной партии. Факт принятия груза на борт судна удостоверяется подписанием и выдачей оригиналов чартерных коносаментов. Все принятые на борт грузы в контейнерах фиксируются в манифесте на грузы.



Рис. 3. Процесс принятия контейнеров на борт судна

Условные обозначения: ————— — материальный поток; - - - - — информационный поток

Таким образом, предварительная информация по коносаментным партиям груза в контейнерах, находящихся на борту судна в формате ПИТ1 на данном этапе, должна быть полностью сформирована, при этом грузоотправители обязаны передать перевозчику УИН ПИТ 1 на все контейнерные партии для формирования ПИТ2. Риски данного этапа связаны с невозможностью в некоторых случаях сформировать полную информацию формата ПИТ2 из-за отсутствия на данный момент (согласно условиям чартера) сведений о судозаходах (например, судно следует в ордерную точку и только там капитан получает информацию о порте выгрузки).

### 4-й этап — операции на переходе (рис. 4 и 5).

На данном этапе существует несколько возможных вариантов следования судна, оказывающих влияние на формирование информационного потока для таможенных целей. Рассмотрим формирование информационного потока для таможенных целей для каждого случая отдельно.

На рис. 4 представлен наиболее простой вариант развития событий (вариант А). При полной загрузке (согласно условиям чартера) судно выходит из иностранного порта и следует в российский порт назначения. В процессе перехода порт назначения не изменяется. Сведения для передачи предварительной информации по всем коносаментным партиям от заинтересованных лиц в формате ПИТ1 сформированы и переданы на таможенный пост порта назначения при отправлении судна из иностранного порта. На переходе, не позднее 24 часов до фактического прибытия судна в порт (при переходе более суток) и не позднее четырех часов (при переходе менее суток) капитан подает предварительную информацию в портовые, таможенные и другие службы порта следования о времени прибытия судна и о грузе (контейнерах), в том числе подлежащих выгрузке (информация формата ПИТ2).

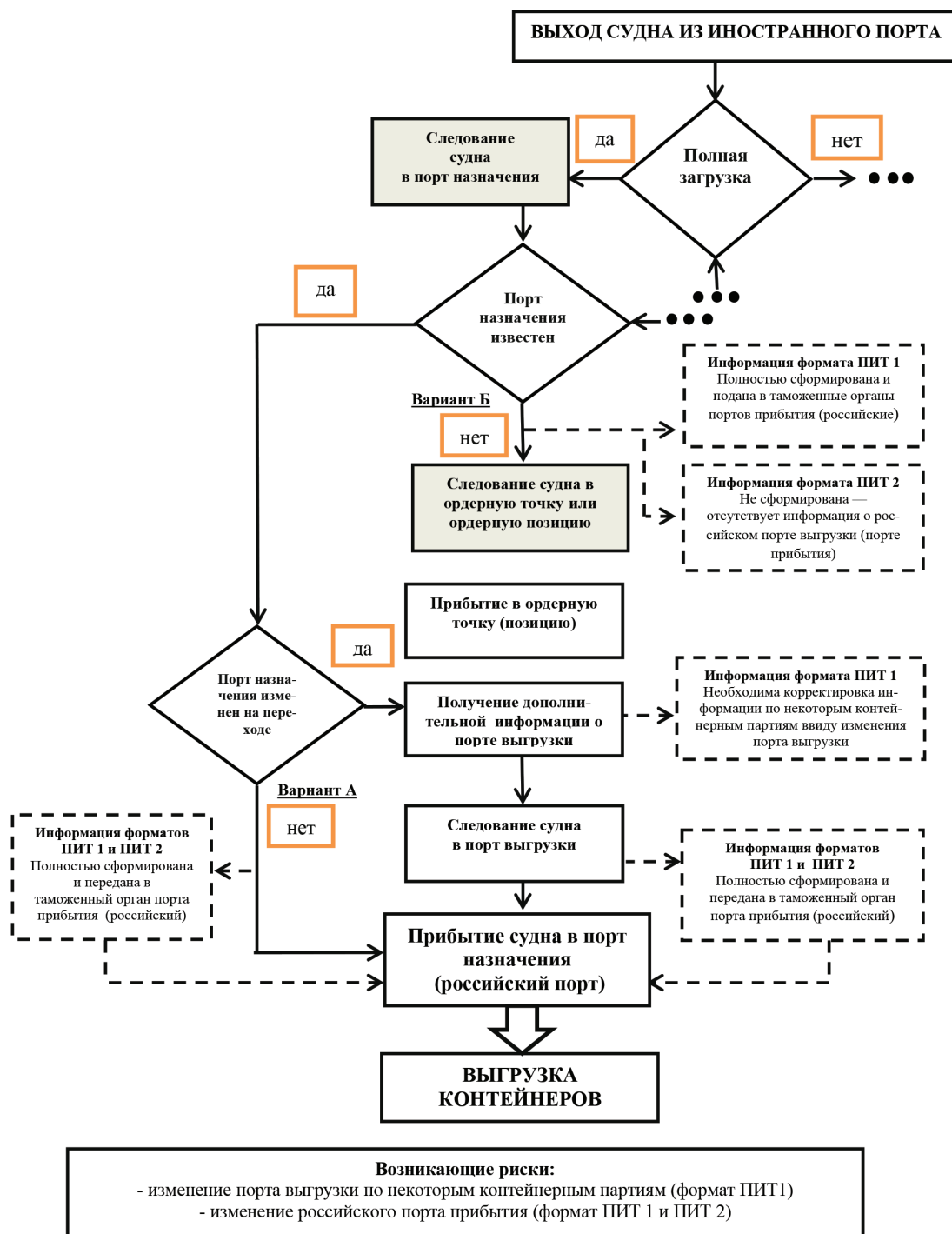


Рис. 4. Процесс доставки груза из иностранного порта в российский порт (варианты А и Б)

Условные обозначения: ————— — материальный поток; - - - - - — информационный поток

Таким образом, формирование информационного потока для таможенных целей согласно варианту А полностью совпадает с организацией процесса формирования предварительной информации для таможенных целей при плановых морских перевозках [10]. Изучив технологические особенности работы программных средств порталов FILL BILL, ФТС России «Электронное предоставление сведений» и прототипа портала «Морской порт», нами сделан вывод о том, что именно по рассмотренному ранее варианту реализуется технология предварительного информирования в морском пункте пропуска. При этом подача предварительных сведений форматов ПИТ1 и ПИТ 2 осуществляется в разовом порядке, т. е. выполнение корректировки в дальнейшем не предусмотрено. Однако на практике возможны случаи, когда необходимо вносить изменения и дополнения в уже переданные предварительные сведения в форматах ПИТ1 и ПИТ 2.

Возможен такой вариант развития событий, когда конкретный порт выгрузки заранее неизвестен или может быть изменен из-за экономической составляющей перевозки, а также безопасности мореплавания (см. рис. 4, вариант Б). Так, если в чартере указан опцион или рейдж, то капитан судна лишь по прибытии в ордерную точку или на ордерную позицию получает информацию от фрахтователя или его агента, в каком конкретно порту будет происходить выгрузка. Экономическая составляющая связана с переадресацией груза, более выгодными тарифами на обработку груза в соседнем порту и т. п. Изменение порта выгрузки может быть связано также с погодными или навигационными условиями. Таким образом, только после прибытия судна в ордерную точку или получения на переходе откорректированной информации о российском порте прибытия предварительная информация формата ПИТ2 может быть полностью сформирована и передана перевозчиком в таможенный орган порта прибытия. При этом требуется корректировка информации ПИТ1 по некоторым коносаментным партиям грузов в связи с уточнением порта прибытия, так как она первоначально могла быть направлена в таможенный орган любого из портов, указанных в чартерном коносаменте.

Возможен еще и такой вариант, когда судно не загружено в полном объеме в порту отправления и возникает ситуация с мертвым фрахтом (рис. 5). В зависимости от условий чартера возможно или невозможно принятие дополнительного груза в другом иностранном порту. Невозможность принятия груза иногда связана с оплатой фрахтователем «мертвого фрахта» по согласованной в чартере ставке, запретом на принятие дополнительного груза либо с отсутствием дополнительного груза в других иностранных портах. В этом случае судно следует в российский порт для выгрузки, и формирование информационного потока (ПИТ1 и ПИТ2) осуществляется аналогично описанным ранее вариантам А или Б (см. рис. 4).

В случае возможности принятия дополнительного груза в другом иностранном порту (рис. 5) судно следует в указанный судовладельцем (или фрахтователем) порт для дозагрузки. Сведения для передачи предварительной информации перевозчиком (ПИТ2) могут быть полностью сформированы и переданы государственным контролирующим органам порта прибытия только после дозагрузки в иностранных портах и получения перевозчиком УИН ПИТ1 по дополнительно принятому грузу во всех портах дозагрузки. На данном этапе также возникают риски возникновения недостоверной информации по форме ПИТ1 по некоторым партиям грузов в контейнерах в связи с изменением порта выгрузки, ПИТ2 о судозаходах и российском порте прибытия и т.п.

Полная и достоверная информация по всем видам груза в контейнерах форматов ПИТ1 (с присвоенными УИН ПИТ1) и ПИТ2 может быть сформирована в большинстве случаев только на последнем этапе — этапе выхода судна из иностранного порта (по варианту А), прибытия в ордерную точку (позицию) или получения корректировки информации на переходе (по варианту Б) либо после дозагрузки в других иностранных портах (вариант В). Таким образом, процесс формирования грузопотока при внеплановых перевозках более сложен и имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при внедрении системы обязательного предварительного информирования таможенных органов Российской Федерации [4].

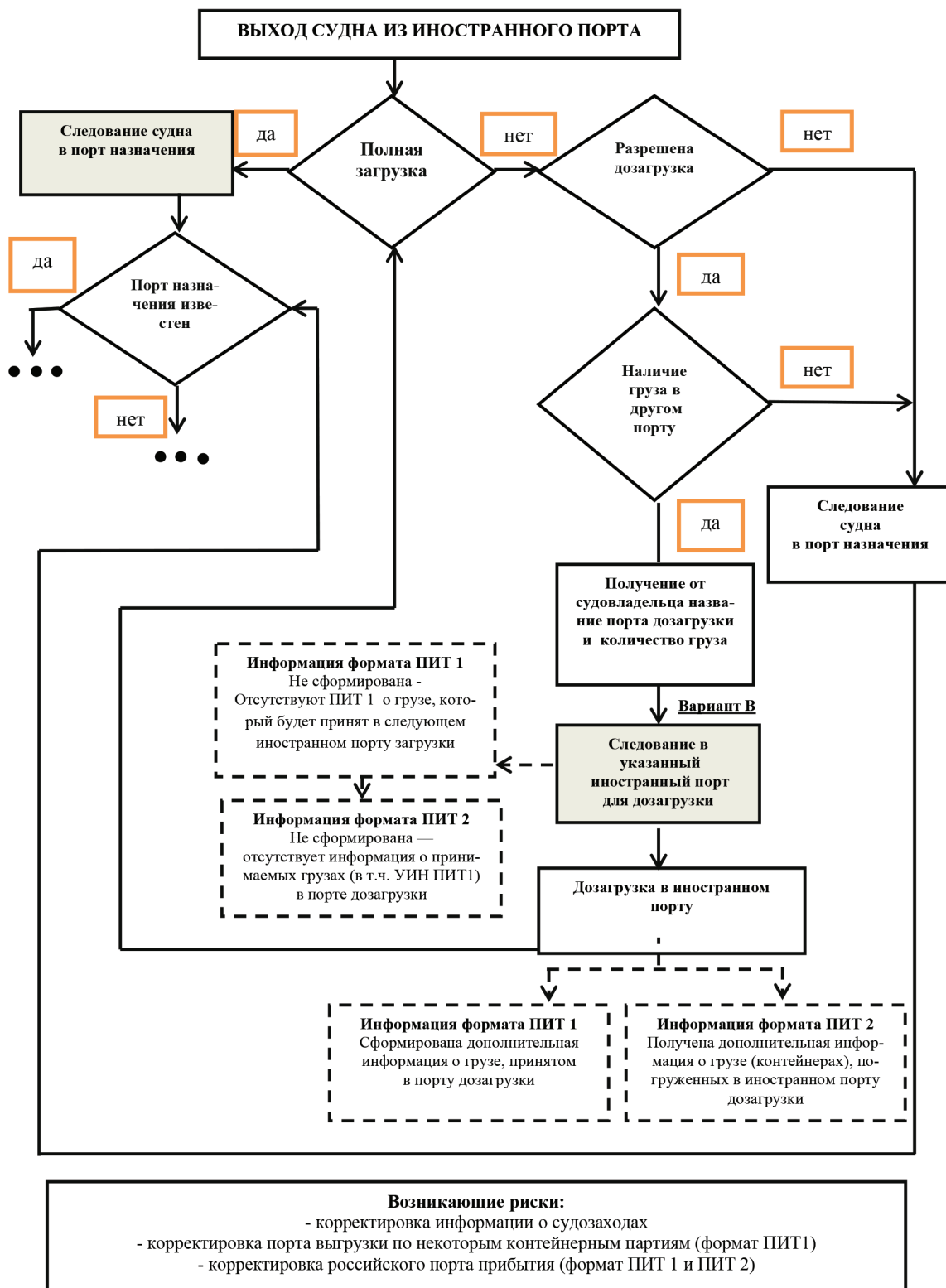


Рис. 5. Процесс доставки груза из иностранного порта в российский порт (вариант В)  
Условные обозначения: ————— материальный поток; - - - - - информационный поток

### Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены проблемы формирования информационного потока для таможенных целей при внеплановых перевозках, связанные с отсутствием на первых этапах полной и достоверной информации о российских портах назначения всех погруз-

женных контейнеров и всех судозаходах в иностранные порты загрузки, а также отсутствием возможности корректировки представленной предварительной информации форматов ПИТ1 и ПИТ2, а именно:

1) в случае изменения порта назначения груза, находящегося в контейнере, информация ПИТ1, поданная в ранее обозначенный порт прибытия, становится неактуальной, а в таможенном органе нового порта прибытия информация о данном грузе в формате ПИТ1 отсутствует;

2) если в процессе перехода фрахтователем изменен российский порт прибытия, то информация, поданная перевозчиком в таможенные органы порта прибытия (ПИТ2), становится недостоверной;

3) в случае указания в чартере ордерной точки или ордерной позиции полная и достоверная информации по формам ПИТ1 и ПИТ2 может быть сформирована только после сообщения фрахтователем российского порта захода по прибытию в ордерную точку или ордерную позицию или получения откорректированной информации на переходе.

Кроме того, как отмечалось ранее, все контейнеры, погруженные на судно, должны иметь УИН ПИТ1, иначе судно по технологии предварительного информирования оформляться не будет из-за неполной информационной базы данных в ПИТ2.

Таким образом, на наш взгляд, решение указанных проблем возможно в следующих случаях:

– доработка используемых программных средств порталов FILL BILL, ФТС России «Электронное предоставление сведений» и прототипа портала «Морской порт», а именно, добавление функции корректировки представленных сведений форматов ПИТ1 и ПИТ2;

– допущение возможности подачи заинтересованными лицами информации ПИТ1 в портал «Электронное предоставление сведений» и прототип портала «Морской порт» по перевозимым грузам «без привязки» к конкретному таможенному посту региона прибытия;

– организация судоходными компаниями системы контроля за получением от грузоотправителя УИН ПИТ1 по всем коносаментным партиям перевозимого груза.

Предложенные мероприятия по адаптации программных средств, используемых в технологии предварительного информирования, с учетом специфических особенностей организации внеплановых перевозок позволят участникам транспортного процесса более эффективно использовать современные таможенные информационные технологии при международной морской перевозке грузов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маликова Т. Е. Системный анализ взаимодействия участников транспортного рынка при оформлении грузов в морском порту / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 25–29.

2. Антонова Е. И. Проблемы и перспективы внедрения технологии предварительного информирования на морском транспорте / Е. И. Антонова, Т. И. Белоусова, Е. В. Дикарев // Совершенствование системы информационно-технического взаимодействия таможенных органов с внешними системами: сб. материалов межвузовской молодежной науч.-практ. конф. каф. информатики и информационных таможенных технологий / под ред. канд. техн. наук И. И. Никитченко. — М.: Российская таможенная академия, 2014. — С. 25–29.

3. Антонова Е. И. Развитие технологии предварительного информирования на морском транспорте / Е. И. Антонова, Т. И. Белоусова, Е. В. Дикарев // Информатизация и связь. — 2014. — № 2. — С. 110–113.

4. Ануфриев А. Б. Экспериментальная система предварительного информирования при перевозках морским транспортом / А. Б. Ануфриев, А. А. Ковылин // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. — 2011. — № 4. — С. 38–47.

5. Вербило О. М. Пути повышения пропускных способностей портовых контейнерных терминалов / О. М. Вербило // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 137–144.

6. Попов А. А. Экономические аспекты развития морских пунктов пропуска / А. А. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 137–141.

7. Об утверждении Концепции системы предварительного информирования таможенных органов Российской Федерации [Электронный ресурс]: приказ ФТС РФ от 10.03.2006 г. № 192. — Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения — 25.03.15).

8. Мельникова Д. В. Проблемы применения таможенных информационных технологий в портах Сахалинской области / Д. В. Мельникова, Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады Одиннадцатой Междунар. науч.-практ. конф. 2 – 4 октября 2015 г. — Владивосток: ДВО ПАТ, 2015. — С. 86–88.

9. Таныгина К. Е. Система оценки эффективности деятельности таможенных органов в морских пунктах пропуска / К. Е. Таныгина, А. В. Зырянова, Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады Одиннадцатой Междунар. науч.-практ. конф. 2 – 4 октября 2015 г. — Владивосток: ДВО ПАТ, 2015. — С. 110–111.

10. Янченко А. А. К вопросу внедрения технологии предварительного информирования в линейном судоходстве / А. А. Янченко, А. Ж. Радочинская // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2015. — № 4. — С. 19–23.

## THE IMPLEMENTATION OF PRELIMINARY INFORMING TECHNOLOGY OF CUSTOMS AUTHORITIES IN SEA SPOT CARGO TRANSPORTATION

*The paper studies the generating process of information flow in spot transportation by sea and identifies the necessary conditions for implementing the technology of preliminary informing customs authorities in transportation by sea. The structural analysis made by the authors in the course of the study gives a framework for generating import cargo flow in spot transportation by sea. The study proves that the preliminary informing mechanism for goods moved by sea was developed without specific characteristics of cargo flow generating in spot transportation. The characteristic features of the technological process of cargo flows generating in spot transportation enables to highlight a few variants of development: in preliminary informing the information coming from carrier and consignor either cannot be comprised or becomes false. As result, the ship cannot be cleared according to the technology of preliminary informing. To avoid the revealed problems the authors propose the activities how to change the technology of preliminary informing customs authorities for sea transportation.*

*Keywords: container, ship, carrier, sea shipping, preliminary information, customs authorities.*

## REFERENCES

1. Malikova, T. E., and A. A. Yanchenko. “The system analysis of transport market participants interaction in the process of goods clearance at sea port.” *Nauchnye problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 4 (2015): 25–29.
2. Antonova, E. I., T. I. Belousova, and E. V. Dikarev. “Challenges and prospects for implementation of preliminary informing technology by sea transportation.” *Sovershenstvovaniye sistemy informatsionno-tehnicheskogo vzaimodeystviya tamozhennykh organov s vneshnimi sistemami: sbornik materialov mezhvuzovskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kafedry informatiki i informatsionnykh tamozhennykh tehnologii*. Ed. I. I. Nikitchenko. M.: Rossiyskaya tamozhennaya akademiya, 2014: 25–29.
3. Antonova, E. I., T. I. Belousova, and E. V. Dikarev. “Preliminary development technology awareness on sea transport.” *Informatization and communication* 2 (2014): 110–113.
4. Anufriev, A. B., and A. A. Kovylin. “Jeksperimentalnaja sistema predvaritelnogo informirovaniya pri perevozkah morskim transportom.” *Tamozhennaya politika Rossii na Dalnem Vostoke* 4 (2011): 38–47.
5. Verbilo, O. M. “Possibilities to increase port container terminal capacity”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 137–144.
6. Popov, A. A. “Economic aspects of marine border crossing point.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 137–141.
7. Ob utverzhdenii Konceptii sistemy predvaritel'nogo informirovaniya tamozhennykh organov Rossijskoj Federacii. Web. 25 March 2015. <<http://www.consultant.ru>>.

8. Melnikova, D. V., and T. E. Malikova. "Problemy primeneniya tamozhennykh informacionnykh tehnologii v portah Sahalinskoj oblasti." *Problemy transporta Dalnego Vostoka: doklady odinnadsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2015 g. Vladivostok: DVO RAT, 2015: 86–88.*

9. Tanygina, K. E., A. V. Zyryanova, and T. E. Malikova. "Sistema ocenki jeffektivnosti dejatel'nosti tamozhennykh organov v morskikh punktah propuska." *Problemy transporta Dalnego Vostoka: doklady odinnadsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2015 g. Vladivostok: DVO RAT, 2015: 110–111.*

10. Yanchenko, A. A., and A. Z. Radochinskaya. "K voprosu vnedreniya tehnologii predvaritel'nogo informirovaniya v linejnom sudohodstve." *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona 4 (2015): 19–23.*

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маликова Татьяна Егоровна —  
доктор технических наук, доцент.  
Морской государственный университет  
имени адмирала Г.И. Невельского  
*TanMalik@mail.ru*  
Янченко Анна Анатольевна — аспирант.  
Научный руководитель:  
Маликова Татьяна Егоровна.  
Морской государственный университет  
имени адмирала Г.И. Невельского  
*annanyan@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malikova Tatiana Egorovna —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor.  
Maritime State University named  
after Admiral G.I. Nevelskoi  
*TanMalik@mail.ru*  
Yanchenko Anna Anatol'evna — postgraduate.  
Supervisor:  
Malikova Tatiana Egorovna.  
Maritime State University named  
after Admiral G.I. Nevelskoi  
*annanyan@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 678-06

**В. И. Решняк,  
О. В. Витязева**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ОБЪЕКТАХ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Статья посвящена актуальной для современного мира проблеме переработки отходов. В ней анализируется возможность повторного использования такой субстанции отходов, как пластмассы, образующиеся при эксплуатации судов и береговых объектов водного транспорта — судоремонтных и судостроительных заводов и портов. Исследуемый вид отходов запрещен к сбросу в море, что приводит к накоплению большого его количества и необходимости последующей переработки. В качестве основного способа переработки таких отходов предложено использовать утилизацию. Показано, что пластиковые материалы характеризуются разными перспективами утилизации, определяемыми физико-химическими свойствами этого вида субстанции. Показано, что с точки зрения возможной утилизации практически все пластмассы целесообразно разделить на две группы: термопластичные и термореактивные. Также показано, что утилизация термопластичных пластмасс представляет собой технологически более простой процесс, что позволяет повысить степень повторного использования веществ и материалов и тем самым обеспечить рациональное использование природных ресурсов. Одновременно это дает возможность организовать собственное производство некоторых изделий, применяемых, например, в судоремонте или в судостроении с использованием в качестве сырьевого материала утилизируемой пластиковой субстанции.

**Ключевые слова:** отходы, пластмассы, утилизация, повторное использование, рациональное использование природных ресурсов, термопластичные и термореактивные пластики.

### Введение

Проблема отходов хорошо известна. Водный транспорт, в частности, является источником образования отходов производства судостроения, образуемых в результате технологического про-

цесса перемещения пассажиров и грузов, а также в процессе эксплуатации судов. Кроме того, источником образования отходов являются собственно суда, выведенные из эксплуатации. В судостроительном производстве основную массу отходов составляет металл, однако и другие материалы (например, пластмассы) тоже образуют отходы. И если относительное количество (относительно, например, металла) пластмасс невелико, то в абсолютном исчислении количество отходов из них является значительным в силу того, что судно вообще представляет собой очень материалоёмкое сооружение. Следует отметить, что процесс перемещения пассажиров и грузов также характеризуется образованием отходов. Например, при перевозке пассажиров образуется немалое количество упаковки, в основном изготовленной из пластиковых материалов. В процессе эксплуатации судов также образуются отходы из пластмасс в виде обрывов тросов и сетей, пластиковой упаковки грузов, пластиковой упаковки продуктов питания и других пластиковых изделий. Согласно данным источника [1], любой пластик запрещено сбрасывать в море.

В целом огромное количество отходов, окружающих нас в повседневной жизни, уже не может не обращать на себя внимания. Накоплено большое количество выведенных из эксплуатации средств транспорта, неиспользуемого технологического оборудования, отходов различных технологических процессов и производств, а также бытового мусора. Образование отходов приводит к загрязнению окружающей среды, и соответственно (что еще хуже) к исчерпанию природных ресурсов, так как является следствием одностороннего движения природной субстанции, используемой для производства изделий и впоследствии превращаемой в отходы [2] – [4]. Образование отходов является завершающей стадией жизненного цикла существования изделий и материалов. В соответствии с публикацией [5] все отходы делятся на отходы *производства* и *потребления*. Ненужные изделия и материалы люди выбрасывают в окружающую среду. В этом месте обрывается поток вещества, которое люди используют для удовлетворения своих потребностей и огромное его количество выбрасывается в окружающую среду. Ежегодно в мире образуется более 700 млрд т отходов. Это означает, что ежегодно такая масса вещества изымается из всех естественных процессов и выбрасывается в окружающую среду за исключением того, что мы уже начинаем вторично использовать, однако это пока незначительная доля указанного количества отходов.

Масса отходов продолжает увеличиваться намного интенсивнее роста населения. Это объясняется тем, что потребление материалов и изделий на душу населения может быть различным и зависит, в большей степени, от таких социальных факторов, как общий уровень жизни, культуры и образования, а также от экономических факторов: структуры экономики и уровня экономического развития страны. Например, наименьшее потребление бумаги (в африканских странах) от наибольшего (в Америке) отличается более чем в 40 раз, а от среднего в мире — в семь раз. Даже в разных странах Европы потребление бумаги отличается более чем в восемь раз [6].

Процесс образования отходов, согласно данным источника [7], сопровождает человечество с начала его существования. Однако только сравнительно недавно люди обнаружили в этом проблему для себя и среды своего обитания, т. е. природной среды, в которой мы существуем и с которой связаны множеством сложных связей.

### Современные методы утилизации отходов

Решение проблемы отходов началось с их складирования. Несмотря на очевидные и уже осознанные недостатки этого способа, отходы продолжают собирать в свалки. Позже, когда люди осознали бесперспективность складирования отходов, появилась идея их уничтожения, например, при помощи сжигания. Сейчас становится понятно, что этот способ наносит едва ли не меньший вред окружающей среде, чем складирование отходов, так как при сжигании уничтожается субстанция и атмосферный воздух загрязняется продуктами сжигания. Кроме того, зачастую сжигание отходов осуществляется при сжигании топлива, так как сами отходы не всегда хорошо горят.

Более современным и эффективным с многих точек зрения является такой способ решения проблемы отходов, как их утилизация, которая, в свою очередь, понимается как повторное использование вещества отходов в процессе производства материалов и изделий. Утилизация отхо-

дов в целом представляет собой комплекс определенных действий. Она может быть организована различными способами в соответствии с данными источников [8] – [10]. Одним из направлений утилизации является переработка отходов с целью получения вторичной субстанции (вторичного сырья), для последующего производства материалов и изделий.

В последние годы одним из наиболее распространенных материалов, используемых в нашей жизни, являются пластические массы. Такое широкое их распространение определяется, прежде всего, широким диапазоном свойств, а также значительными возможностями регулирования этих свойств. Среди огромного количества видов пластиков к основным из них относятся: полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, полипропилен, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления, полиамиды, полистирол, поликарбонаты А, полибутилентерефталат. Области применения некоторых наиболее распространенных пластиков приведены в следующей таблице.

**Области применения пластиков**

| Вид пластика                        | Область применения пластика                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ)    | Наиболее широкое распространение для бытовых нужд при изготовлении бутылок, емкостей, контейнеров, одежды, в технике — для армирования автомобильных шин, шлангов, транспортных лент и многих резинотехнических изделий                                              |
| Поливинилхлорид (ПВХ)               | Изоляция проводов, кабелей, использование при производстве пленки, листовых материалов, труб, линолеума, мебельной фурнитуры, окон, дверей, а также в производстве хлорированного поливинилхлорида, который обладает самой высокой огнестойкостью среди термопластов |
| Полипропилен (ПП)                   | В производстве упаковочных пленок, мешков, труб, тары, предметов быта, для шумо- и виброизоляции в строительстве, для теплоизоляции (пенополипропилен ППП), для изготовления строительных клеев, замазок (атактический полипропилен)                                 |
| Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)  | В производстве пленки, тары, труб канализации и водопроводных, корпусов маломерных судов, в благоустройстве придомовых территорий, а также как теплоизоляция (вспененный полиэтилен)                                                                                 |
| Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Полиамиды (ПА)                      | В машиностроении как конструкционный материал, в медицине — хирургические нити, искусственные кровеносные сосуды, в пищевой промышленности для изготовления оболочки мясных изделий                                                                                  |
| Полистирол (ПС)                     | Для производства одноразовой посуды, упаковки, детских игрушек, а также в строительстве применяется как облицовочные конструкции и материалы, звукопоглощающие панели, как фильтрующий материал (вспенивающийся полистирол) для очистки воды                         |

Определить вид пластика и идентифицировать его можно по метке на изделии, которая соответствует правилам стандарта ISO-1043 (рис. 1), — так называемому *коду переработки различных пластиков* (в центре рисунка) [11].

С точки зрения возможности повторного использования, а также сложности процессов их переработки при утилизации пластики целесообразно разделить на две группы: пластики термопластичные и пластики термореактивные. К первым относятся пластики, которые при нагреве расплавляются и при последующем остывании превращаются в материал с прежними свойствами. Ко вторым относятся пластики, которые в процессе их получения претерпевают необратимые изменения, и их утилизация представляет собой более сложные процессы.

Отходы термопластичных пластмасс (термопластов) состоят из макромолекул, соединенных между собой только физическими связями. Энергия разрыва физических связей невелика и составляет 12 – 30 кДж/моль. При нагревании физические связи ослабевают, что делает материал текучим, а при охлаждении — восстанавливаются и материал приобретает твердость.

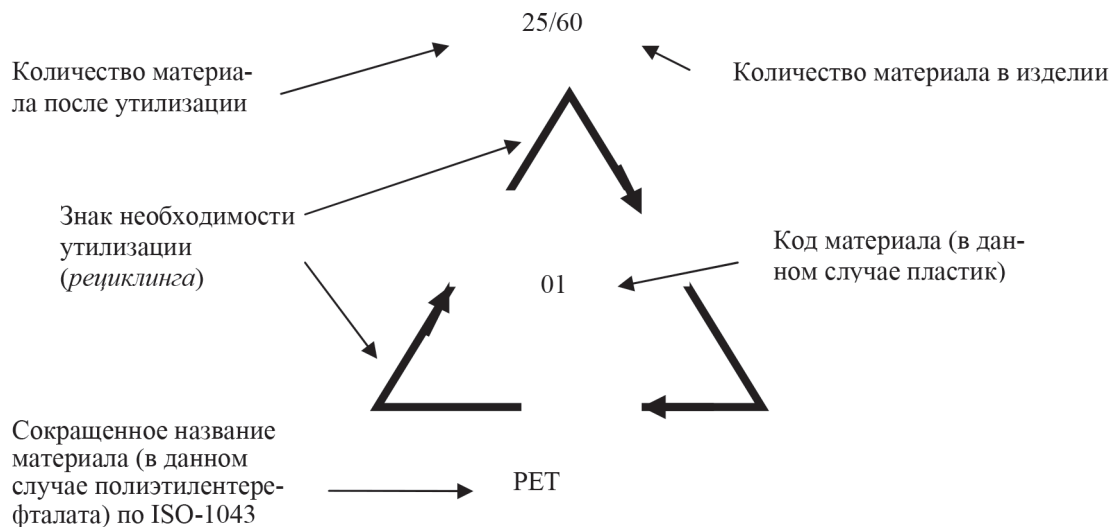


Рис. 1. Информация о материале пластикового изделия в соответствии с ISO-1043

Энергия разрыва химических связей, соединяющих мономерные звенья в цепную макромолекулу, многократно превышает указанные значения и составляет 200 – 460 кДж/моль. Поэтому при нагревании термопластов до температуры плавления физические связи ослабевают, а химические — ковалентные — сохраняются, и, следовательно, сохраняется неизменным химическое строение полимера. При охлаждении и затвердевании такого расплава физические связи и основные физические свойства термопластичного полимерного вещества восстанавливаются. Таким образом, термопласты, во-первых, допускают формование изделий из расплава с его последующим охлаждением и затвердеванием и, во-вторых, могут перерабатываться многократно. Это, в свою очередь, позволяет возвращать в производственный цикл отходы производства, брак, изделия, утратившие потребительскую ценность.

Процесс переработки включает в себя измельчение утилизируемого изделия из пластика и грануляцию (рис. 2). Полученные гранулы применяются уже как сырье, например, в процессе изготовления новых изделий экструзией.

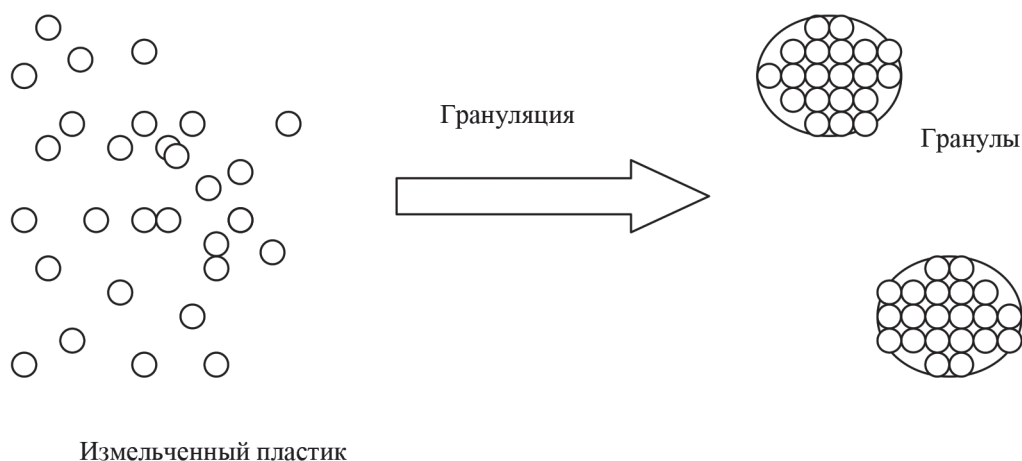


Рис. 2. Процесс переработки термопластичных пластиков при их повторном использовании

Термореактивные пластики (реактопласты) состоят из макромолекул, соединенных поперечными ковалентными, т. е. химическими связями. Образовавшаяся сетчатая химическая структура необратима. Нагревание сетчатых полимеров приводит не к расплавлению, а к разрушению пространственной сетки, сопровождающемуся термодеструкцией. С точки зрения практики это

означает, что реактопласты претерпевают необратимые изменения в процессе получения изделия. Поэтому термореактивные отходы производства не утилизируются способами, подобными утилизации пластомеров.

Термопластичные полимеры (полиэтилен, полистирол, поливинил, полипропилен и другие) легко многократно перерабатываются в продукцию нового назначения, так как под воздействием тепла могут повторно размягчаться, переходя в вязкотекучее состояние, и формоваться с применением различных технологий. Изделия, полученные из отходов термопластичных полимеров, по физико-механическим свойствам сопоставимы с изделиями из первичных пластмасс. Согласно данным источника [12], полиэтиленовые отходы (пленка, крошка, негодные детали, брак) могут также выступать в качестве компонента композиционных материалов (например, для изготовления труб, тары и другой продукции широкого потребления).

Следует отметить, что перспективным методом переработки термопластичных полимеров является *экструзия* — способ переработки полимерных материалов непрерывным продавливанием их расплава через формующую головку, геометрическая форма выходного канала которой определяет профиль получаемого изделия или полуфабриката (рис. 3). Около половины производимых термопластов перерабатываются в изделия этим способом. С помощью экструзии получают пленки, листы, трубы, шланги, капилляры, прутки, сайдинг, различные по сложности профили, наносят полимерную изоляцию на провода, производят многослойные разнообразные по конструкции и сочетанию применяемых пластмасс гибридные погонажные изделия. Переработка вторичных полимеров и гранулирование также выполняются с применением экструзионного оборудования.

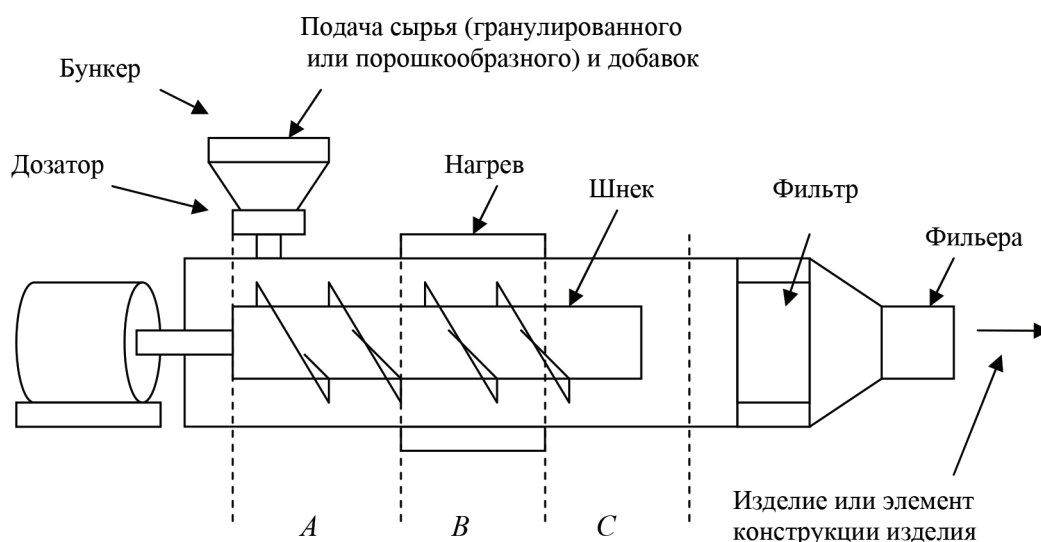


Рис. 3. Принципиальная схема экструдера:  
A — загрузка сырья; B — область разогрева и расплавления;  
C — дозирование массы сырья в область формирования изделия

В процессе данного способа переработки исходное сырье засыпается (вручную или с помощью специального загрузчика) в бункер экструдера. Из бункера, минуя горловину загрузочной воронки, сырье попадает в загрузочную зону шнека, а затем транспортируется по цилиндру пластикации. От сдавливания, перемешивания и контакта с нагретым цилиндром и шнеком полимерное сырье расплавляется и превращается в однородную массу — *расплав*.

Повторное использование отходов термореактивных полимерных материалов представляет собой более сложную проблему. Такие полимерные материалы при повторном нагревании не размягчаются, не растворяются практически ни в каких растворителях, а на свалках не гниют и не разлагаются. Повторная их переработка в основном выражается в измельчении дроблением. В таком виде они используются в качестве добавок при производстве дорожных покрытий и стро-

ительных материалов. Еще одним способом утилизации реактопластов является *прямое прессование* [13] – [14]. Кроме того, реактопласты могут быть утилизированы путем *пиролиза*, когда в результате термического разложения реактопластов образуются новые субстанции, использование которых может иметь иное назначение [15] – [17].

Новизна настоящей работы заключается в следующем. Предложен процесс утилизации отходов в целом и пластиков, в частности, который следует считать процессом получения материалов для последующего производства изделий. Утилизация путем сжигания приводит к загрязнению окружающей среды и не позволяет экономить природные ресурсы вещества. Выполненный анализ свойств пластиковых материалов позволяет разработать основы организации процесса их утилизации. Прежде всего, для производства изделий, используемых на водном транспорте, рекомендуется применять *термопласты*, утилизация которых обеспечивает наиболее высокую степень повторного (многократного) использования субстанции отходов. Кроме того, простота утилизации этого вида пластиков позволяет рекомендовать организацию данного процесса непосредственно на объектах водного транспорта, совместив их, например, с судостроительным производством.

### Заключение

Таким образом, в настоящей статье проанализированы основные рекомендации по организации процесса утилизации пластиковых отходов, образующихся на объектах водного транспорта. Показано, что перспективным направлением решения проблемы отходов является их утилизация как процесс повторного (многократного) использования вещества отходов в ходе изготовления материалов и изделий. В этом случае утилизация позволяет экономить природные ресурсы и снижает загрязнение окружающей среды. Повторное использование вещества отходов имеет эволюционное значение, так как утилизация (как предлагается понимать данный процесс в настоящей статье) замыкает поток вещества, который человечество направляет через себя подобно тому, как это осуществляется в природе.

В последнее время одним из достаточно распространенных материалов в отрасли водного транспорта являются пластмассы, которые по своим свойствам являются достаточно стойкими к влиянию внешних воздействий, а следовательно, и «долгоживущими» отходами. Поэтому утилизация пластиков является наиболее целесообразным решением проблемы отходов. Однако пластики как вещества, обладающие разными свойствами, могут быть утилизированы разными способами. Способы утилизации пластиков характеризуются разным уровнем сложности и эффективности с точки зрения степени повторного использования вещества отходов (степени утилизации), уровня загрязнения окружающей среды и затрат. Наиболее простым процессом является утилизация термопластов. Этот процесс заключается в измельчении утилизируемых изделий, гранулировании и, собственно, повторном использовании в процессе производства новых изделий. Термопласты в процессе утилизации удается возвращать в состояние первоначального вещества, из которого были изготовлены утилизируемые изделия. Простота утилизации термопластов делает перспективным развитие соответствующих локальных установок, которые могут применяться, например, на судостроительных производствах для последующего изготовления новых изделий.

Более сложным является процесс утилизации реактопластов. Чаще всего при их утилизации вещество утилизируемых реактопластов используется в другом качестве. Утилизация реактопластов, как правило, требует организации специальных более сложных производств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78) (рус., англ.) (с изм. на 26 сентября 1997 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901764502> (дата обращения: 14.01.2016).
2. Дубинская М. Пластиковый апокалипсис / М. Дубинская // Эхо планеты. — 2011. — № 34. — С. 30–32.

3. Материалы региональной молодежной науч.-практ. конф. «Проблема твердых бытовых отходов в городе Владивостоке: пути решения». Владивосток, 30 – 31 октября 2009 г. — Владивосток: Изд-во «Апельсин», 2009. — 42 с.

4. Гонка Е. А. Негативное влияние пляжного туризма на состояние прибрежной зоны в Приморском крае // V Междунар. студенческая электронная науч. конф. «Студенческий научный форум» 15 февраля – 31 марта 2013 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2013/252/3820> (дата обращения: 26.02.2016).

5. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.vashdom.ru/gost/53692-2009> (дата обращения: 14.01.2016).

6. Бумага для глобальных рынков [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.idanmetsatiето.info/tiedostot/tiedotteet/Savelainen1.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).

7. Сильги К. История мусора: от средних веков до наших дней / К. Сильги; пер. с фр.: И. Васюченко, Г. Зингер. — М.: Текст, 2011. — 279 с.

8. Решняк В. И. Основные направления утилизации отходов / В. И. Решняк, Е. М. Морозова // Современные тенденции развития науки и технологии. — 2016. — № 2, 3. — С. 110–114.

9. Белова М. С. Проблемы утилизации упаковочных материалов в России и за рубежом / М. С. Белова, О. А. Легонькова // Пищевая промышленность. — 2011. — № 6. — С. 26–28.

10. ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества. — Ч. 1. Руководящие указания. [Электронный ресурс] / — Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/ISO9004194Upravleniekache.html> (дата обращения: 14.01.2016).

11. ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1. Основные полимеры и их специальные характеристики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200126394> (дата обращения: 03.02.2016).

12. Пиролиз — эффективная переработка органических отходов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://i-рес.ru> (дата обращения: 16.02.2016).

13. Каблуков В. И. Переработка отходов пластмасс в строительный материал / В. И. Каблуков, Р. А. Торян // Экология и промышленность России. — 2007. — № 1. — С. 20–21.

14. Пармухина Е. Л. Способы обращения с пластиковыми отходами / Е. Л. Пармухина // Экологический вестник России. — 2010. — № 6. — С. 38–40.

15. Овчинникова Г. П. Современные подходы к рециклингу вторичного полиэтилентерефталата / Г. П. Овчинникова, Р. А. Абдуллаев, С. Е. Артеменко // Пластические массы. — 2008. — № 1. — С. 27–28.

16. Passamonti F. J. Recycling of waste plastics into fuels. LDPE conversion in FCC / F. J. Passamonti, U. Sedran // Applied Catalysis B: Environmental. — 2012. — Vol. 125. — Pp. 499–506. DOI: 10.1016/j.apcatb.2012.06.020.

17. Wang C.-Q. Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry // C.-Q. Wang, H. Wang, Y.-N. Liu // Waste Management. — 2015. — Vol. 35. — Pp. 42–47. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.09.025.

## RESEARCH THE POSSIBILITY OF RECYCLING PLASTICS WASTE GENERATED AT THE ON OBJECTS OF WATER TRANSPORT

*The article is devoted to the problem of the modern world of recycling. It analyzes the possibility of re-use of such waste substances, such as plastics, formed by the operation of vessels and onshore facilities of water transport - ship-repair and shipbuilding yards and ports. The test is prohibited type of waste to dumping in the sea, resulting in the accumulation of large quantities of it and the need for further processing. The primary method of processing such waste disposal proposed use. It is shown that plastic waste materials are characterized by different perspectives determined physicochemical properties of this kind of substance. It is shown that from the point of view of possible recycling of almost all plastics should be divided into two groups: thermoplastic and thermosetting. It is also shown that the utilization of thermoplastics is a technologically simple process that allows you to increase the degree of re-use of substances and materials and thereby ensure the rational use of natural resources. At the same time it gives an opportunity to organize their own production of certain products used, such as in ship repair and shipbuilding, using as raw material recyclable plastic substance.*

**Keywords:** waste, plastic, recycling, reuse, sustainable use of natural resources, thermoplastic and thermosetting plastics.

## REFERENCES

1. Mezhdunarodnaya konvenciya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov 1973 goda, izmenennaya Protokolom 1978 goda k nej (MARPOL 73/78) (rus., angl.) (s izmeneniyami na 26 sentyabrya 1997 goda). Web. 14 Jan. 2016 <<http://docs.cntd.ru/document/901764502>>.
2. Dubinskaya, M. "Plastikovyj apokalipsis." *EHkho planety* 34 (2011): 30–32.
3. *Materialy regionalnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Problema tverdyh bytovykh othodov v gorode Vladivostoke: puti resheniya»*. Vladivostok, 30 oktyabrya — 31 oktyabrya 2009 g. Vladivostok: Izd-vo «Apelsin», 2009.
4. Gopka, Ye. A. Negativnoe vliyanie plyazhnogo turizma na sostoyanie pribrezhnoj zony v Primorskom krae. V Mezhdunarodnaya studencheskaya ehlektronnaya nauchnaya konferenciya «Studencheskij nauchnyj forum» 15 fevralya — 31 marta 2013 goda. Web. 26 Feb. 2016 <<http://www.scienceforum.ru/2013/252/3820>>.
5. GOST R 53692-2009. Resursosberezhenie. Obrashchenie s othodami. EHtapy tekhnologicheskogo cikla othodov. Web. 14 Jan. 2016 <<http://www.vashdom.ru/gost/53692-2009>>.
6. Bumaga dlya globalnyh rynkov. Web. 16 Feb. 2016 <<http://www.idanmetsatiето.info/tiedostot/tiedotteet/Savelainen1.pdf>>.
7. Silgi, K. *Istoriya musora: ot srednih vekov do nashih dnei*. M.: Tekst, 2011.
8. Reshnyak, V. I., and E. M. Morozova. "Osnovnye napravleniya utilizacii othodov." *Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii* 2–3 (2016): 110–114.
9. Belova, M. S., and O. A. Legonkova. "Problems of recycling of packing materials in Russia and abroad." *Food processing industry* 6 (2011): 26–28.
10. ISO 9004-1-94. Upravlenie kachestvom i ehlementy sistemy kachestva. CHast' 1. Rukovodyashchie ukazaniya. Web. 14 Jan. 2016 <<http://www.gosthelp.ru/text/ISO9004194Upravleniekache.html>>.
11. GOST 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011) Plastmassy. Uslovnye oboznacheniya i sokrashcheniya. CHast' 1. Osnovnye polimery i ih special'nye harakteristiki. Web. 03 Feb. 2016 <<http://docs.cntd.ru/document/1200126394>>.
12. Piroliz - ehffektivnaya pererabotka organicheskikh othodov. Web. 16 Feb. 2016 <<http://i-pec.ru>>.
13. Kablukov, V. I., and R. A. Toroyan. "Pererabotka othodov plastmass v stroitelnyj material." *Ecology and Industry of Russia* 1 (2007): 20–21.
14. Parmuhina, E. L. "Sposoby obrashcheniya s plastikovymi othodami." *Ekologicheskij vestnik Rossii* 6 (2010): 38–40.
15. Ovchinnikova, G. P., R. A. Abdullaev, and S. E. Artemenko. "Sovremennye podhody k reciklingu vtorichnogo poliehtilentereftalata." *International Polymer Science and Technology* 1 (2008): 27–28.
16. Passamonti, F. J., and U. Sedran. "Recycling of waste plastics into fuels. LDPE conversion in FCC." *Applied Catalysis B: Environmental* 125 (2012): 499–506. DOI: 10.1016/j.apcatb.2012.06.020.
17. Wang, C.-Q., H. Wang, and Y.-N. Liu. "Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry." *Waste Management* 35 (2015): 42–47. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.09.025.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решняк Валерий Иванович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
[RV53@mail.ru](mailto:RV53@mail.ru), [kaf\\_chemistry@gumrf.ru](mailto:kaf_chemistry@gumrf.ru)  
Витязева Ольга Владимировна —  
кандидат педагогических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
[vitjazeva\\_olga@mail.ru](mailto:vitjazeva_olga@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reshnyak Valery Ivanovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
[RV53@mail.ru](mailto:RV53@mail.ru), [kaf\\_chemistry@gumrf.ru](mailto:kaf_chemistry@gumrf.ru)  
Vitjazeva Olga Vladimirovna —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
[vitjazeva\\_olga@mail.ru](mailto:vitjazeva_olga@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

## **ВОПРОС РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО СУДОХОДСТВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЛОЖЕНИЙ КОНВЕНЦИИ ООН О КОДЕКСЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ**

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с Конвенцией ООН о Кодексе поведения линейных конференций, в том числе изложена краткая история принятия данной конвенции, а также ключевые моменты, обсуждаемые сторонами во время работы над текстом этого документа. Приведена необходимая информация о содержании Кодекса поведения линейных конференций, его целях и принципах. С позиции данного документа рассмотрены вопросы взаимоотношения линейных конференций с грузовладельцами и их объединениями. В части, посвящённой тарифам Конференции, указаны критерии для определения фрахтовых ставок и надбавок. Значительное место в статье отведено деятельности надлежащего органа, роли правительства как надлежащего органа, законодательным и иным мерам, которые должны быть приняты договаривающимися сторонами для обеспечения выполнения Кодекса поведения линейных конференций. В связи с расширением сферы применения данного кодекса рассмотрены причины, согласно которым этот документ является актуальным в настоящее время и может быть использован для решения широкого спектра практических задач, связанных с регулированием отрасли морских перевозок и развитием национального морского торгового флота.*

*Ключевые слова:* регулирование перевозок, Кодекс поведения линейных конференций, линейные конференции, конференциальные соглашения, линейные перевозки, фрахтовый рынок, тарифы конференций, фрахтовые ставки, фрахтовые надбавки, надлежащий орган.

### **Введение**

Приступая к исследованию Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций [2] (далее — Кодекс), целесообразно привести определение линейного судоходства, данное в Рекомендациях Конференции ООН по торговле и развитию ЮНКТАД о применении Кодекса и в статье [1]: «Под линейным судоходством понимается регулярная перевозка судами грузов, принадлежащих неопределённому кругу грузоотправителей (грузополучателей), между портами захода по объявленному расписанию. Линейный перевозчик является общественным перевозчиком, то есть не может проводить дискриминацию каких-либо потребителей, грузов или линейных портов. Перевозчик должен принимать к перевозке грузы без ограничения минимального количества и организовать работу с грузами в портах, на определённых перевозчиком терминалах (причалах) с которыми имеет договорные отношения». В целях исключения разрушительной взаимной конкуренции между отдельными перевозчиками во второй половине XIX в. судовладельцы, оказывающие услуги по перевозке грузов на определённых направлениях, стали объединяться в Конференции.

В Кодексе [2] дано следующее определение понятия «линейные конференции»: «Линейная конференция или Конференция — группа, состоящая из двух или более перевозчиков, эксплуатирующих суда, которые предоставляют услуги по международным линейным перевозкам грузов на определённом направлении или направлениях в обусловленных географических пределах и которые имеют соглашение или договорённость, независимо от их характера, в рамках которых они осуществляют перевозки по единым или общим тарифным ставкам и на любых других согласованных условиях в отношении предоставления линейных услуг» [2, с. 95].

Следует отметить, что Конференции определяли общие принципы работы линейных перевозчиков, включая совместную фрахтовую политику. В течение непродолжительного периода времени Конференции получили чрезвычайно широкое распространение, и практически повсеместно большая часть морских линейных перевозок осуществлялась конференциальным тонна-

жем. Однако в середине XX в. все стороны, так или иначе заинтересованные в морских линейных перевозках, поняли, что дальнейшее существование Конференций невозможно без определения общих и обязательных, с правовой точки зрения, принципов их работы, выходящих за рамки сотрудничества между отдельными хозяйствующими субъектами. Был сформулирован и получил широкое распространение тезис о более или менее жёстком регулировании деятельности объединений перевозчиков.

По оценке Е. В. Кирилловой в работе [3] эти события произошли вследствие существенного изменения рынка линейных перевозок. Так, с одной стороны, разрушение колониальной системы привело к нарушению сложившегося в течение нескольких столетий миропорядка, что в области международного морского торгового судоходства создало значительные проблемы для Конференций. Появились грузовладельцы и перевозчики, представляющие развивающиеся страны, в том числе страны, освободившиеся от колониальной зависимости. С другой стороны, значительных масштабов достигла концентрация капиталов в отрасли морских перевозок, поддерживаемая и регулируемая правительствами большинства «морских» капиталистических государств. Между национальными, транснациональными группами грузовладельцев и перевозчиков обострились противоречия, которые привели к торговым войнам между государствами. Действенную силу на рынке морских линейных перевозок стали представлять советы и ассоциации грузовладельцев. На просторах Мирового океана начал успешно работать торговый флот социалистических государств, прежде всего СССР, Германской Демократической Республики и Польской Народной Республики. Столь масштабные изменения предопределили появление Кодекса поведения линейных конференций в результате обсуждения его на уровне Организации Объединённых Наций. При этом каждая из договаривающихся сторон, согласно данным источника [4], приступая к работе над Кодексом, преследовала собственные цели, которые были подробно раскрыты в статье Кодекса [2] «Деятельность объединений морских перевозчиков накануне принятия Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций».

Существующие на момент начала обсуждения Кодекса противоречия можно объединить в следующие группы.

1-я группа. Противоположность интересов стран, не имеющих или имеющих незначительный линейный флот и представляющих в основном интересы грузоотправителей, и стран, представляющих основных линейных перевозчиков.

2-я группа. Противоположность интересов стран, флот которых используется главным образом для перевозки грузов третьих стран и которые пропагандируют неограниченную свободу конкуренции (Великобритания, Скандинавские страны) и стран, ведущих крупную морскую торговлю, владеющих большим объёмом морского тоннажа и в связи с этим отстаивающих определённые преференции для своего флота (ФРГ, Бельгия, Франция, Япония).

3-я группа. Противоречия между традиционными морскими державами и некоторыми развивающимися странами, обладающими крупным торговым флотом и стремящимися к укреплению позиций своего флота в международном линейном судоходстве.

### **Краткая информация об истории принятия Кодекса**

Как отмечалось ранее, в середине XX в. деятельность линейных конференций подвергалась все большей критике со стороны правительств, организаций грузовладельцев, судоходных линий развивающихся и социалистических стран. Однако, и для перевозчиков, в том числе конференциальных линий, большую проблему составляла как возрастающая конкуренция со стороны так называемых аутсайдеров, в действительности часто представляющих из себя мощных, контролируемых государством национальных перевозчиков или отдельные, весьма успешные компании, амбиции которых не были должным образом удовлетворены в рамках консервативной системы линейных конференций.

Национальные судовладельцы Европы и Японии в 1971 г. ответили на эту ситуацию созданием проекта Кодекса практики для линейных конференций, который впоследствии стал известен

под названием «Кодекс КЕНСА» (КЕНСА, Комитет европейских национальных ассоциаций судовладельцев). Этот документ был принят правительствами стран-участников Консультативной группы по морским перевозкам, в которую входили Бельгия, Греция, Дания, Италия, Нидерланды, Норвегия, Соединённое Королевство, Федеративная Республика Германии, Финляндия, Франция, Швеция и Япония. Двенадцать капиталистических стран с развитым судоходством считали, что целью Кодекса является укрепление уверенности в действенности системы конференций и что данный документ призван оградить конференции от обвинений в недобросовестности и дискриминации путём соблюдения высокого уровня справедливой практики».

Наиболее подробно о подготовке и принятии Конвенции рассказал советский учёный В. В. Петровский, являющийся непосредственным участником процесса подготовки Кодекса, в работе [5]. Он отметил, что группа в 1972 г. рассмотрела Кодекс КЕНСА, который был представлен правительством Нидерландов как официальный документ, однако делегации развивающихся стран посчитали его неприемлемым. Помимо Кодекса КЕНСА существовало ещё три проекта: проект ЮНКТАД, в котором была предложена идея международного контроля, а также проекты африканских и азиатских развивающихся стран и стран Латинской Америки, которые были очень похожи и основывались на следующих принципах:

- Конференции обязаны консультироваться с грузоотправителями до принятия решений, которые могут оказать влияние на торговлю;
- уровень ставок должен отвечать задачам торговли развивающихся стран;
- деятельность Конференций не может прямо или косвенно дискриминировать торговлю или судоходство развивающихся стран;
- судоходные компании развивающихся стран должны приниматься в Конференции на равных основаниях на тех направлениях, где они представляют интересы своей страны.

Разногласия между сторонами было выявлено сразу по всем разделам проекта Кодекса, а единая точка зрения была выработана контактной комиссией, состоящей из представителей 21 страны, только по процедурным вопросам структуры Кодекса, который, по общему мнению, должен был состоять из следующих разделов:

- цели и основы конференций;
- взаимоотношения между линиями-членами;
- взаимоотношения с грузоотправителями;
- фрахтовые ставки;
- прочие вопросы;
- процедура и форма введения Кодекса в действие.

В связи с тем, что делегации, участвующие в работе Комитета по судоходству, не смогли урегулировать разногласия, появилась необходимость перенести обсуждение этого вопроса на Пленарную сессию. На сессии, согласно решению, принятому на основании голосования 74 участников (19 голосов против, двое воздержалось), была принята резолюция, обращённая к Генеральной Ассамблее ООН, рекомендовать на своей 27-й сессии созыва 1973 г. Конференции представителей правительств принятие Кодекса. По решению 27-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН был создан подготовительный комитет по выработке Конвенции о Кодексе поведения линейных конференций в составе 48 государств. Государства, вошедшие в этот комитет, были определены Генеральным секретарём ЮНКТАД по географическому ключу региональных групп: 27 — из группы развивающихся стран, 14 — из группы развитых капиталистических стран и 7 — из группы социалистических стран.

В 1973 г. подготовительный комитет провёл несколько сессий, на которых обсуждались различные проекты Кодекса [2] и разрабатывался проект Конвенции. Работа была направлена на преодоление разногласий и нахождение компромиссных вариантов. С 12 ноября по 15 декабря 1973 г. в Женеве состоялась Конференция ООН по принятию Кодекса, в которой приняли участие делегации 84 стран. Направленный в адрес Конференции представителей правительств, проект Кодекса, тем не менее, содержал незначительное число согласованных предложений и, скорее, представлял собой «свод разногласий» отдельных стран или групп стран.

Во время проведения конференции представителей правительств наиболее остро проявились разногласия между позициями развивающихся и развитых капиталистических стран. Однако за три недели были согласованы тексты значительного числа статей Кодекса, а в конце четвертой недели удалось для решений остальных принципиальных положений выработать комплексное соглашение («package deal»). Поскольку дальнейшая работа по подготовке текста Кодекса требовала дополнительного времени, было принято решение возобновить работу Конференции представителей правительств 11 марта 1974 г. Заключительный этап работы завершился в апреле 1974 г. принятием Кодекса [2]. За принятие этого документа голосовали делегации 72 государств, в том числе развивающихся и социалистических стран, а также делегации Франции, ФРГ, Бельгии, Турции, Испании, Японии и Австралии. Особый интерес представляет тот факт, что против голосовали семь стран: Великобритания, США, Швейцария и Скандинавские страны. Воздержались Греция, Нидерланды, Италия, Канада и Новая Зеландия.

Конвенция о Кодексе была открыта для подписания с 1 июля 1974 г. по 30 июня 1975 г., а после этого открыта для присоединения к ней. Согласно источнику [6], для вступления в силу Конвенции потребовалось участие в ней не менее 24 стран, флот которых на тот момент составлял 25 % мирового линейного тоннажа. Кодекс должен был вступить в силу по истечении шести месяцев от даты, когда не менее 24 государств, общий тоннаж которых составляет, по меньшей мере, 25 % мирового тоннажа, станут её Договаривающимися сторонами. Эти критерии были выполнены, когда Конвенция была ратифицирована Нидерландами и Федеративной Республикой Германии 6 апреля 1983 г. в качестве пятьдесят седьмой и пятьдесят восьмой Договаривающихся сторон, в результате чего тоннаж всех Договаривающихся сторон стал составлять 28,67 % соответствующего тоннажа.

#### **Содержание Кодекса поведения линейных конференций**

Текст Кодекса [2] включает, кроме преамбулы, содержащей цели и принципы, семь глав.

Глава 1. Определение терминов.

Глава 2. Отношение между линиями-участниками Конференций.

Глава 3. Отношения с грузоотправителями.

Глава 4. Тарифные ставки.

Глава 5. Прочие вопросы.

Глава 6. Принципы и механизмы разрешения споров.

Глава 7. Заключительные положения.

В Кодексе [2] чётко определены цели и принципы. Главными целями являются содействие упорядоченному расширению мировой морской торговли, развитие регулярных и эффективных линейных услуг, отвечающих потребностям торговли, а также обеспечение равновесия интересов как судовладельцев, так и грузоотправителей. Основные принципы состоят в том, что не должна иметь место никакая дискриминация в отношении участников линейных отношений. Конференции должны периодически проводить консультации с организациями грузоотправителей, их представителями по значимым вопросам, они должны предоставлять заинтересованным лицам необходимую информацию о своей деятельности.

Кодекс [2] указывает на то, что любая национальная линия имеет право быть полноправным членом конференции, обслуживающей внешнюю торговлю её страны при условии предоставления доказательства своей способности и намерения осуществлять адекватный сервис. Адекватным является такой сервис, который предоставляет *регулярное, достаточное и эффективное обслуживание линейных перевозок на долгосрочной основе, принятие обязательств соблюдать все условия конференции и внесение необходимого депозита*. Согласно ст. 19 Кодекса [2], Конференции принимают все необходимые меры к тому, чтобы их линии были способны обеспечить эффективное обслуживание, при котором максимально исключена возможность скопления судов и больших интервалов между их отходами.

Закрепив право национальных линий в конференциальном сервисе, Кодекс определяет доли национальных перевозчиков. В целях определения доли перевозок, которую имеют право полу-

чить судоходные линии каждой страны, все они рассматриваются в этом документе как единая группа судоходных линий этой страны, независимо от общего числа линий. При определении доли перевозок отдельных линий или их групп должны соблюдаться принципы, закрепленные в Кодексе. Эти правила-принципы сводятся к тому, что группа национальных судоходных линий каждой из двух стран имеет равные права на участие в перевозках по фрахту и количеству грузов, относящихся к их взаимной внешней торговле и осуществляемых конференцией. Судоходные линии третьих стран, которые участвуют в конференции, могут получить 20 % перевозок, имеющих отношение к этой торговле, по фрахту и количеству грузов. Указанные правила закреплены в Кодексе [2, ч. 1, гл. II, ст. 2, п. 4].

В том случае, если обсуждаемые вопросы относятся к внешнеторговым перевозкам между двумя странами, Кодекс устанавливает, что принятие решений возможно только при согласии национальных линий. В случае, если у страны нет национальных линий, которые участвуют в перевозках, её доля должна быть перераспределена между остальными линиями, участвующими в перевозках, пропорционально их долям. Безусловно, размер долей согласовывается самими участниками. Когда у обеих стран не имеется национальных линий, участвующих в перевозках, то их доли должны быть распределены между конференциальными линиями третьих стран посредством проведения переговоров между линиями. Следует отметить, что для такой ситуации в Кодексе не предусмотрено положения, согласно которому правительство договаривающейся стороны должно определять, какие линии получают долю национальных линий договаривающейся стороны.

Кодексом в числе основных принципов устанавливается, что между конференцией, организациями грузоотправителей или их представителями проводятся консультации по вопросам, представляющим взаимный интерес и имеющим значение для сторон. Полномочия представителей грузоотправителей должны быть подтверждены национальным компетентным органом (дословно — надлежащий орган). Согласно Кодексу, надлежащим органом выступает Правительство или иной орган, который наделён полномочиями исполнять любые функции, предусмотренные для такого органа положениями Кодекса. Иным органом может выступать любой другой орган, имеющий соответствующие полномочия в силу действующего национального законодательства или при делегировании ему соответствующих полномочий правительством.

Консультации проводятся по инициативе любой из сторон. Надлежащие органы могут участвовать по просьбе любой или обеих сторон в консультациях, однако это не означает, что они занимают позицию стороны, принимающей решение. Предметом консультаций в Кодекс установлены следующие вопросы:

- изменение общих условий тарифов и уровня тарифных ставок;
- установление специальных (поощрительных) тарифных ставок;
- установление надбавок;
- заключение соглашений о лояльности;
- изменение тарифной классификации портов;
- установление порядка предоставления грузоотправителями необходимой информации по поводу грузов;
- вопросы, касающиеся предъявления грузов.

Также консультации могут проводиться по следующим вопросам: функционирование органов по инспекции груза, изменение характера обслуживания, обсуждение последствий введения новых технологий перевозок, качество обслуживания морских перевозок (в том числе влияние соглашений о пулах, о распределении портов обслуживания, числа отходов судов на обеспеченность тоннажем морских перевозок и т. п.), а также по вопросам изменения районов обслуживания и регулярности заходов судов конференции в порты. Консультации должны быть проведены до момента принятия окончательных решений. Если это невозможно, то срочные решения могут быть приняты до осуществления консультаций. Консультации должны начинаться не позднее, чем через 30 дней после получения предложения от какой-либо стороны или от обеих сторон

о проведении консультаций. В Кодексе [2, гл. IV] сформулированы принципы создания и применения конференциальных тарифов, порядок их изменения, введения скидок и надбавок.

Кодексом установлены критерии и положения для определения тарифных ставок в [2, гл. IV ст. 12]. В соответствии с этими положениями уровень тарифных ставок должен быть минимальным, насколько это возможно и допустимо для судовладельцев. Эксплуатационные расходы должны (желательно) рассчитываться по круговому рейсу судов в прямом и обратном направлениях, которые рассматриваются как единое целое. В случае установления специальных (поощрительных) тарифных ставок на отдельные товары должны учитываться связанные с этими товарами условия торговли стран, особенно развивающихся, а также стран без выхода к морю, обслуживаемых Конференцией.

Как указано в ст. 13 Кодекса, тарифы Конференций не должны приводить к несправедливым различиям в положении между грузоотправителями, находящимися изначально в одинаковых условиях. Судоходные линии-члены Конференции должны строго соблюдать все правила и условия, названные в тарифах, в различных соглашениях, заключенных в соответствии с Кодексом, а также во всех опубликованных документах конференции. Кодекс поведения линейных конференций [2, ст. 16] в части надбавок определяет, что надбавки, применяемые для покрытия чрезвычайного увеличения издержек или снижения доходов, считаются временными и они должны быть уменьшены по мере улучшения положения или при изменении обстоятельств, из-за которых потребовалось их введение. До введения надбавок, как общих, так и относящихся только к определённому порту, должно быть сделано уведомление сторонам и если возникает необходимость, то проводится консультация по правилам Кодекса. Несомненно, данный документ содержит ряд случаев-исключений, когда надбавки могут быть введены немедленно без проведения консультаций.

В ст. 17 Кодекса указано, что изменения валютного курса (в том числе девальвация, ревальвация), которые ведут к изменениям в совокупных эксплуатационных расходах или доходах судоходных линий конференций, являются основанием для введения валютного коэффициента корректировки тарифных ставок или их изменения. Такая корректировка должна быть проведена таким образом, чтобы в итоге линии-члены не извлекли для себя дополнительной выгоды, равно как и не несли бы лишних потерь. Она может осуществляться как в форме валютных надбавок или скидок, так и в виде повышения или снижения тарифных ставок.

### **Роль правительства как надлежащего органа в соответствии с Кодексом**

Кодекс [2] чётко определяет как права правительств договаривающихся государств, следующие из Конвенции ООН о кодексе поведения линейных конференций, так и их обязанности. Эта часть Кодекса представляет значительный интерес в связи с тем, что Российская Федерация является одной из договаривающихся сторон, а Конвенция ООН является действующим (в российской юрисдикции) международным нормативным актом, являющимся составной частью правовой системы РФ в соответствии с п. 1 ст. 5 ФЗ «О международных договорах Российской Федерации» [7]. Поэтому, в силу действия Конвенции ООН, у государства возникают определённые права и обязанности. Так, ст. 47 Кодекса возлагает на правительства государств, являющихся договаривающимися сторонами Конвенции, прямую ответственность за принятие надлежащих законодательных и иных мер, которые могут быть необходимы для обеспечения выполнения Конвенции. В Кодексе содержится также положение о надлежащем органе для выполнения некоторых функций по применению положений Конвенции. Надлежащим органом может быть либо само правительство в полном составе, либо уполномоченный орган правительства или любой орган, назначенный в качестве такового. Кодекс допускает все эти возможности. В частности, Кодекс [2, гл. I] определяет две функции надлежащего органа:

– признание национальной судоходной линии «надлежащим органом», которое служит основным критерием для определения того, является ли судоходная линия национальной судоходной линией или нет;

– определение организации грузоотправителей в целях осуществления деятельности, связанной с применением Кодекса, также предусматривающее её признание надлежащим образом.

В Кодексе [2, гл. I] содержится ряд положений, касающихся роли надлежащего органа. Надлежащий орган может либо по собственному желанию, либо по просьбе заинтересованных сторон действовать следующим образом:

(a) Обеспечивать учёт их мнений по вопросу о приёме в Конференцию новой линии-участника Конференции;

(b) В сотрудничестве с органами на другом конце направления обсуждать вопрос, являющийся предметом спора между их группами национальных судоходных линий, и сообщать своё мнение заинтересованным сторонам для их рассмотрения;

(c) Получать уведомления от Конференций о мерах, принятых в связи с злоупотреблениями и / или нарушениями на основе принципа анонимности;

(d) Получать копии Конференциальных соглашений, соглашений о пулах или других соглашений о числе отходов судов, а также других соответствующих документов;

(e) Запрашивать информацию, копии ежегодных докладов Конференции и уведомления о предполагаемой деятельности Конференции;

(f) Принимать в полной мере участие в консультациях между Конференциями и грузоотправителями, но без права участия в принятии решений;

(g) Принимать участие в процессе примирения, поддерживая сторону, имеющую национальность данной Договаривающейся стороны, или стороны в споре, возникшем в связи с внешней торговлей этой Договаривающейся стороны, либо выступать в качестве наблюдателя в таком примирительном процессе.

Несмотря на то, что Кодекс не наделяет надлежащий орган правом участия в принятии решений на консультациях между грузоотправителями и конференциями, надлежащий орган может, в силу своего положения, играть эффективную роль в формировании тех выводов, которые будут сделаны на консультациях, проводимых с его участием. Кроме того, надлежащий орган может влиять на политику конференций через свои национальные судоходные линии, особенно в тех случаях, когда они принадлежат государству. Надлежащие органы могут предложить Конференциям информировать их о принимаемых перевозчиками мерах, направленных на соблюдение положений Кодекса. Если эти меры будут сочтены недостаточно удовлетворительными, правительство может предложить конференции провести с ним консультации по данному вопросу.

ЮНКТАД в Руководстве [8, ч. 1, гл. 3, разд. А] отмечает, что желательно, чтобы правительства и конференции проводили периодические консультации по вопросам применения Кодекса к соответствующим Конференциальным перевозкам. Такие периодические консультации могут быть отнесены к иным мерам, которые могут быть необходимы для обеспечения выполнения настоящей Конвенции. Договаривающиеся стороны обязаны принимать их в соответствии со ст. 47 Кодекса. В то же время, если Конференции не сотрудничают с правительствами, Договаривающиеся стороны могут добиваться защиты своих национальных интересов путём принятия детально разработанного исполнительного законодательства, которое ограничивает использование гибкого подхода и компромиссов.

В Руководстве [8, ч. 1, гл. 3, разд. А] по применению Кодекса, разработанном ЮНКТАД, отмечается: «Пожелания и требования, с которыми надлежащие органы могут обращаться к конференциям для исполнения контролирующих функций, заключаются в следующем:

(a) Включение в рассылочный список на постоянной основе документов, которые должны предоставляться по просьбе в соответствии с Кодексом;

(b) Включение надлежащих органов в список тех, кто имеет право запрашивать информацию о фраховых тарифных ставках;

(c) Включение надлежащих органов в список органов, имеющих право требовать проведения консультаций в связи с общим повышением тарифных ставок;

(d) Включение надлежащих органов в список тех, кого необходимо уведомлять о введении в действие надбавок и коэффициентов валютной корректировки».

Эти вопросы имеют большое значение в странах, где национальные Советы грузовладельцев слабы. ЮНКТАД считает, что такие меры будут способствовать укреплению позиций национальных организаций грузовладельцев в их отношениях с конференциями». В связи с этим необходимо отметить, что в настоящее время в Российской Федерации национальные Советы (Ассоциации) грузовладельцев не просто слабы, но даже не определен их статус в целях участия в переговорном процессе с линейными перевозчиками и их объединениями.

#### **Законодательные и иные меры, которые должны быть приняты договаривающимися сторонами для обеспечения выполнения Кодекса**

Законодательные меры, которые необходимо принять договаривающейся стороне для соблюдения положений Кодекса, зависят от существующего законодательства и от национальной правовой системы. Выражение «существующее законодательство» охватывает не только законодательство, непосредственно касающееся вопросов морских перевозок, в случае Кодекса оно может включать законодательство, касающееся, например, конкуренции и ограничительной практики, а также общего торгового права [8, ч. 1, гл. 1].

Кодекс [2, ст. 47] указывает на законодательные меры, которые должны приниматься договаривающимися сторонами. Так, каждая договаривающаяся сторона принимает такие законодательные или иные меры, которые могут быть необходимы для обеспечения выполнения Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций [2]. ЮНКТАД в Руководстве [8] отметил, что положение Кодекса указывает на то, что каждая договаривающаяся сторона должна принять такие законодательные, административные или судебные меры, которые могут быть необходимы для осуществления Кодекса. Иными словами, правительства договаривающихся сторон обязаны принимать необходимые меры, которые позволили бы заинтересованным сторонам действовать в рамках Кодекса. Эти меры могли бы включать принятие законодательства или поправок к существующим законодательным актам с целью придать Кодексу юридическую силу на национальном уровне, а также наделить исполнительные и судебные органы соответствующими полномочиями, необходимыми для обеспечения выполнения Кодекса.

Приведем перечень вопросов, которые, в соответствии с рекомендациями ЮНКТАД [8], следует регулировать на основе национального законодательства и / или иных мер:

- 1) сфера применения Конвенции;
- 2) назначение надлежащего органа или органов;
- 3) назначение национальных судоходных линий;
- 4) признание грузоотправителей и организаций грузоотправителей;
- 5) положение о направлении надлежащему органу всех соглашений, указанных в ст. 6 Кодекса;
- 6) направление конференциями ежегодных докладов;
- 7) предоставление полномочий конференциям и организациям грузоотправителей в целях урегулирования споров;
- 8) приоритет процесса примирения над другими средствами правовой защиты, предусмотренными национальным законодательством;
- 9) обеспечение выполнения решений примирителей в случае споров, передаваемых на международное обязательное примирение;
- 10) национальный механизм урегулирования споров;
- 11) назначение конференциями представителей на местах;
- 12) положение о приведении в исполнение поправок к Конвенции в соответствии со ст. 51 и 52;
- 13) положение о выдвижении кандидатур в группу примирителей.

Договаривающиеся стороны могут изъявить желание включить в своё национальное законодательство определение термина «линейная конференция». Необходимо отметить, что согласно требованиям ЮНКТАД, любое соглашение или договорённость в пределах группы, состоящей из двух или более перевозчиков, эксплуатирующих суда, которая удовлетворяет минимальным критериям, изложенным в Кодексе, образуют, согласно положениям Кодекса, линейную конференцию, независимо от того, как группа себя именует. Значительное место в комментариях и рекомендациях ЮНКТАД, относящихся к Кодексу и порядку его применения, уделено национальным судоходным линиям. ЮНКТАД считает, что в национальном законодательстве или постановлениях необходимо чётко определить критерии, которым должны удовлетворять национальные судоходные линии, стремящиеся получить признание в качестве таковых. В этой связи правительства могут считать, что привилегии и права, вытекающие из назначения в качестве «национальной судоходной линии», должны уравниваться соответствующими обязательствами. Последние могут включать условия, касающиеся регистрации судов линии под национальным флагом и найма в судовую команду граждан данной страны с тем, чтобы действительно можно было осуществлять «эффективный контроль».

Важным моментом в вопросе о национальных судоходных линиях является то, что в содержащемся в Кодексе определении конкретно упоминается *перевозчик, эксплуатирующий суда*, хотя его флот, согласно [2, п. 2 ст. 1], может включать «фрахтованный тоннаж». В современных условиях на некоторых направлениях коммерчески рентабельными могут быть только большие контейнерные суда. Национальная судоходная линия данной страны может считать, что коммерчески наиболее приемлемым вариантом для неё является осуществление деятельности в качестве оператора, занимающегося исключительно фрахтованием части судна у другой линии или Консорциума линий [8].

### **Расширение сферы применения Кодекса поведения линейных конференций**

Критики Кодекса поведения линейных конференций утверждают, что он утратил своё значение в связи с сокращением, а для некоторых направлений и полным исчезновением конференций, указывая при этом, что в настоящее время компании создают альтернативные конференциям формы сотрудничества [9]. Однако, если полностью отказаться от Кодекса, это приведёт к тому, что будут отсутствовать какие-либо условия для «идентификации» не только объединений судовладельцев, которые можно отнести к традиционным, но и таких объединений, которые возникли в последнее время и скромно называются *техническими соглашениями*. В решении такой задачи Кодекс [2] и «Руководство по применению Конвенции о Кодексе поведения линейных Конференций» [8], а также подготовленная секретариатом ЮНКТАД UNCTAD/ST/SHIP/1 публикация 26.01.1987 являются исключительно важными инструментами. Например, в Руководстве [8, гл. 1, разд. Е] дано точное определение такого относительно нового явления в линейном судоходстве, как консорциум: «В результате научно-технической революции, проявившейся в значительном расширении использования стандартной многооборотной тары, в том числе морских контейнеров, возникли *новые формы сотрудничества между судовладельцами, предназначенные для распределения финансового бремени, рисков и экономии от масштаба операций, связанных с капиталовложениями в контейнерные суда и соответствующее оборудование*. Одной из типичных форм такого сотрудничества является Консорциум. В плане простого и общего определения Консорциум является формой временного сотрудничества нескольких мощных фирм или широких заинтересованных кругов для достижения определённой общей цели».

В Кодексе содержится чёткое определение линейных Конференций, и в целом можно отметить, что действие его положений будет распространяться на любое соглашение о сотрудничестве, которое удовлетворяет условиям, предусмотренным в Кодексе, независимо от выбранной организационной формы сотрудничества». Т. е., по мнению ЮНКТАД, действие Кодекса распространяется на консорциумы и любые другие соглашения о сотрудничестве, которые удовлетворяют критериям линейной Конференции, определённым в Кодексе.

### Выводы

1. В данной статье выделены отдельные положения Кодекса [2], дающие общее представление об этом документе и имеющие большое значение для оценки современного рынка морских линейных перевозок. Эти положения важны с практической точки зрения, так как они могут быть использованы для создания системы эффективного регулирования этих рынков в интересах народного хозяйства, что можно рассматривать в качестве первоочередной задачи. Актуальность темы следует из ситуации, возникшей в связи с обсуждением Федерального закона об изменениях в Кодексе торгового мореплавания РФ [10]. Следует отметить, что Законопроектом [11] предлагается дополнить Кодекс торгового мореплавания новой гл. VII.1 «Морское линейное судоходство», а также Решением ФАС России по делу линейных перевозчиков [12].

2. Кодекс является нормативным актом с чётко определёнными положительными целями. Они заключаются в содействии упорядоченному расширению мировой морской торговли, в развитии регулярных и эффективных линейных услуг, адекватных потребностям торговли и в обеспечении равновесия интересов тех, кто предоставляет услуги линейного судоходства, и тех, кто пользуется ими. Эти цели не только не утратили значения с момента принятия Конвенции, но стали ещё более актуальными для Российской Федерации. По мнению авторов, Кодекс имеет большое значение для организации практической деятельности российских перевозчиков и клиентуры морского транспорта.

3. В настоящее время Кодекс следует рассматривать не в жёсткой взаимосвязи с деятельностью Конференций, а преимущественно в части согласия или отказа от целей, принципов и методов регулирования деятельности линейных перевозчиков, определённых Конвенцией. Инструменты регулирования, определённые Кодексом, являются универсальными, на что указывает иностранная практика. При этом следует помнить о том, какая серьёзная работа была проведена отечественными и иностранными специалистами во время подготовки Кодекса.

4. Безусловно, содержание Кодекса не ограничивается теми, хоть и основными, но отдельными статьями, которые были здесь рассмотрены и упомянуты. Кодекс представляет собой весьма содержательный и разнообразный документ. Поэтому целесообразно продолжить знакомство с этим документом по мере уточнения и расширения задач, стоящих перед отраслью морских перевозок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Русинов И. А.* Коротко о линейных конференциях / И. А. Русинов, И. А. Гаврилова, А. Г. Нелогов // *Морской Вестник*. — 2016. — № 2 (58). — С. 48–56.
2. Конвенция о Кодексе поведения линейных конференций (Заключена в г. Женеве 06.04.1974) // *Сборник международных договоров СССР*. — М., 1985. — Вып. XXXIX. — С. 94–121.
3. *Кириллова Е. В.* Ретроспективный анализ становления и развития интеграционных объединений в линейном судоходстве: сб. науч. тр. / Е. В. Кириллова. — Вып. 1. — Иваново: МАРКОВА АД, 2014. — 98 с.
4. *Русинов И. А.* Деятельность линейных конференций накануне принятия Конвенции ООН о Кодексе поведения линейных конференций / И. А. Русинов, И. А. Гаврилова, А. Г. Нелогов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 2 (36). — С. 56–66.
5. *Петровский В. В.* Морское линейное судоходство / В. В. Петровский. — М.: Транспорт, 1977. — 288 с.
6. *Кириллова Е. В.* Антимонопольное освобождение в системе линейного судоходства: сб. науч. тр. / Е. В. Кириллова. — Одесса: Купrienko, 2013. — 113 с.
7. Федеральный закон от 15.07.1995 г. № 101-ФЗ «О международных договорах Российской Федерации» // *Российская газета*. — 1995. — № 140.
8. Руководство по применению Конвенции о Кодексе поведения линейных конференций, подготовленное секретариатом ЮНКТАД. UNCTAD/ST/SHIP/ 1, опублик. 26.01.1987.
9. *Иванова С. Е.* Современные принципы формирования цены перевозки грузов в линейном судоходстве / С. Е. Иванова, Н. В. Митрофанова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2011. — № 1. — С. 175–180.

10. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 г. № 81-ФЗ // Российская газета. — 1999. — № 85–86.

11. Проект Федерального закона № 929151-6 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части линейного судоходства»: принят ГД ФС РФ в первом чтении (ред., внесенная в Гос. думу Федерального Собрания РФ).

12. Решение Комиссии ФАС России по делу № 1-11-313/00-22-13 от 15.12.2015 г.

## REGARDING THE CONTROL OF LINER SHIPPING BASED ON THE ANALYSIS OF THE UN CONVENTION PRINCIPLES OF THE CODE OF CONDUCT FOR LINER CONFERENCES

*Authors consider key points of United Nations' Code of Conduct for Liner Conferences (1974), including short introduction to a history of the Code and matters discussed by Parties prior the Code has been done. In short but self-sufficient form the Authors say about the Code's contain, targets and main principles. With reference to Code the Authors advise some aspects of relationships between Liner Conferences and Shippers, as well as Shipper's Councils. A visible part of the article gives a basic knowledge of Code's requirements to Conference's freight policy, including rates, surcharges, tariff's terms and conditions. The Authors pay attention to a matter of State control and regulation of Conferences' activity which are to be based on Code's requirements to national Laws and appropriate authorities. They explain reasons why the Code of Conduct is to be considered as valid document and how it can be used for the purpose of due regulation and development of shipping industry in Russian Federation.*

*Keywords: regulation of liner shipping, Code of Conduct for Liner Conferences, Liner conference, Conference agreement, liner shipping, freight market, liner tariff, conference tariff, freight rate, freight surcharge, national shipping line, controlled carriers, appropriate authorities in liner shipping.*

## REFERENCES

1. Rusinov, I. A., I. A. Gavrilova, and A. G. Nelogov. "Korotko o linejnyh konferenciayah." *Morskoy Vestnik* 2(58) (2016): Pp. 48–56.
2. "Convention on a Code of Conduct for Liner Conferences. Geneva, 6 April 1974." *Sbornik mezhdunarodnyh dogovorov SSSR*. M., 1985. Vol. XXXIX: 94–121.
3. Kirillova, E. V. *Retrospektivnyj analiz stanovleniya i razvitiya integracionnyh ob'edinenij v linejnom sudohodstve: sb. nauch. tr.* Vyp. 1, t. 1. Ivanovo: MARKOVA AD, 2014.
4. Rusinov, I. A., I. A. Gavrilova, and A. G. Nelogov. "The activities of liner conferences in advance of the Code of conduct for Liner Conferences." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 56–66.
5. Petrovskij, V. V. *Morskoe linejnoe sudohodstvo*. M.: Izdatelstvo «Transport», 1977.
6. Kirillova, E. V. *Antimonopolnoe osvobozhdenie v sisteme linejnogo sudohodstva: sb. nauch. tr.* Odessa: Kuprienko, 2013.
7. "Federalnyj zakon ot 15.07.1995 g. № 101-FZ «O mezhdunarodnyh dogovorah Rossij-skoj Federacii»." *Rossijskaya gazeta* 140 (1995).
8. Rukovodstvo po primeneniyu Konvencii o Kodekse povedeniya linejnyh konferencij, podgotovlennoe sekretariatom YUNKTAD. UNCTAD/ST/SHIP/ 1. 26.01.1987.
9. Ivanova, S. E., and N. V. Mitrofanova. "The modern principals of foundation of cost for carriage of goods in line shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2011): 175–180.
10. "Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossijskoj Federacii ot 30.04.1999 g. № 81-FZ." *Rossijskaya gazeta* 85–86 (1999).
11. Russian Federation. Draft Federal Law N 929151-6. O vnesenii izmenenij v otdelnye zakonodatel'nye акты Rossijskoj Federacii v chasti linejnogo sudohodstva. (red., vnesennaya v GD FS RF. Prinyat GD FS RF v pervom chtenii).
12. Reshenie Komissii FAS Rossii po delu № 1-11-313/00-22-13 ot 15.12.2015 g.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Русинов Игорь Александрович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*RusinovIA@gumrf.ru*  
*Гаврилова Ирина Александровна* —  
кандидат экономических наук.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*Gavrilova.irina.a@gmail.com*  
*Нелогов Андрей Георгиевич* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Русинов Игорь Александрович*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*andrey.nelogov@united-transport.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Rusinov Igor Alexandrovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*RusinovIA@gumrf.ru*  
*Gavrilova Irina Alexandrovna* — PhD.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*gavrilova.irina.a@gmail.com*  
*Nelogov Angrey Georgievich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Rusinov Igor Alexandrovich*.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*andrey.nelogov@united-transport.ru*

*Статья поступила в редакцию 24 марта 2016 г.*

**УДК 656.61.052**

**И. А. Бурмака,  
Г. Е. Калининченко,  
М. А. Кулаков**

### УПРАВЛЕНИЕ ПАРОЙ СУДОВ В СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ

Рассмотрено два типа управления парой судов в условиях опасного сближения с целью предупреждения их возможного столкновения. Первый подход к предупреждению столкновения судов представляет собой общепринятое в судовождении локально-независимое управление, при котором необходима координация маневров взаимодействующих опасно сближающихся судов. Поэтому в статье изложен принцип бинарной координации взаимодействия пары судов при опасном сближении в случае их локально-независимого управления. Указываются методы выбора оптимальной стратегии расхождения при этом типе управления. Приводится характеристика второго подхода к управлению парой судов в ситуации опасного сближения, который осуществляется с помощью принципа полного управления системой двух опасно сближающихся судов внешним управленцем. Для этого типа управления рассматривается возможность определения безопасного маневра расхождения изменением курса с помощью использования области опасных курсов. Также рассмотрена возможность безопасного расхождения судов изменением скорости при неизменных курсах, при этом предлагается использование области опасных скоростей при заданных начальных курсах. Рассмотрены достоинства внешнего управления судами и возможные перспективы его использования.

*Ключевые слова:* предупреждение столкновения судов, типы управления судами при опасном сближении, система бинарной координации, области опасных курсов и опасных скоростей пары судов.



ЕЛЮ статьи является рассмотрение двух типов управления системой  $S_{12}$  пары опасно сближающихся судов для предупреждения столкновения.

Проблема обеспечения безопасного расхождения судов в случае возникновения угрозы их столкновения является одной из наиболее актуальных. В этой ситуации судам надлежит компенсировать ситуационное возмущение путем выполнения маневра расхождения. При этом, как правило, маневр расхождения регламентируется МППСС-72. В стесненных районах плавания

с особенно интенсивным движением для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов оборудуются станции управления движением судов (СУДС). Поэтому исследование вопросов управления судами, которые следуют опасными курсами сближения, является актуальным и перспективным направлением.

В работе [1] приведены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения, а в работе [2] рассмотрены вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения. Принцип внешнего управления тремя судами для компенсации ситуационного возмущения рассмотрен в работе [3]. Вопросам взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения посвящена работа [4], в которой предложена формализация МППСС-72. Различные модели формализации взаимодействия судов при расхождении и процедуры расчета безопасного маневра освещены в работах [5] – [8]. В работе [5] для описания процесса расхождения используются методы теории оптимальных дискретных процессов, применение метода нелинейной интегральной инвариантности предлагается в работе [6], в работе [7] формализация взаимодействия судов при расхождении производится в рамках теории дифференциальных игр. Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [8], в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

После возникновения ситуационного возмущения  $\omega$  необходимо произвести его компенсацию, применяя стратегию расхождения  $G$ , которая обеспечивает увеличение дистанции кратчайшего сближения между судами системы  $S_{12}$  до величины  $D_{\min y}$ , превосходящей предельно-допустимую дистанцию  $D_d$ , т. е.  $D_{\min y} \geq D_d$ . При этом стратегия может содержать маневр расхождения как одного, так и обоих судов. Маневр расхождения судна содержит два участка: участок уклонения судна с программной траектории для увеличения дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min}$  и участок возвращения на программную траекторию движения.

Принципиально важным аспектом управления системой  $S_{12}$  является полнота управления, выраженная двумя различными подходами. Суть первого подхода — локально-независимое управление, суть которого заключается в контроле каждым из судов текущего состояния системы  $S_{12}$  и при наличии ситуационного возмущения его компенсация производится маневрами обоих судов, причем выбор маневра расхождения производится независимо каждым из судов. Для обеспечения безопасности расхождения необходима согласованность маневров расхождения судов, т. е. координация маневров, позволяющая увеличивать дистанцию кратчайшего сближения. При этом типе управления каждое из судов контролирует текущее состояние системы  $S_{12}$ , и при появлении ситуационного возмущения  $\omega$  между судами возникает взаимодействие  $Bz$ , которое программный участок относительного движения с ситуационным возмущением ( $D_{\min} < D_d$ ) трансформирует в относительную траекторию без ситуационного возмущения ( $D_{\min y} \geq D_d$ ).

Взаимодействие  $Bz$  прогнозирует поведение судов при расхождении и предполагает выработку адресных согласованных стратегий каждому из взаимодействующих судов. Поэтому взаимодействие  $Bz$  формально может быть записано следующим образом:

$$G = Bz(\bar{F}),$$

где  $\bar{F} = (D, \alpha, V_1, K_1, V_2, K_2)$  — вектор состояния системы  $S_{12}$ , который характеризуется, соответственно, дистанцией между судами, пеленгом, а также скоростями и курсами судов, причем  $G = (G_1, G_2)$ .

Таким образом, взаимодействие судов  $Bz$  — оператор или отображение параметров состояния системы  $S_{12}$  во множество параметров стратегии расхождения  $G$ , причем взаимодействие  $Bz$  состоит из двух операторов:  $Crd$  — координации маневров и  $Prm$  — расчета параметров маневров.

Взаимодействие  $Bz$  как механизм согласования достижения общей цели предупреждения опасного сближения, определяющее поведение каждого из судов в процессе расхождения и прогнозирующее изменение ситуации, является крайне важным фактором, который оказывает влияние на безопасность расхождения. Таким образом, процесс расхождения является процессом компенсации ситуационного возмущения, т. е. перевода системы  $S_{12}$  в подмножество безопасных

состояний согласно механизму взаимодействия  $Bz$ , а алгоритм реализации процесса расхождения — стратегией расхождения  $G$ .

Реализация взаимодействия  $Bz$  осуществляется с помощью системы бинарной координации или координатора  $c_0(Bz)$ , на вход которого подается вектор состояния  $F$ , а выходом являются адресные сигналы судам  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рис. 1). В свою очередь, каждый из сигналов  $\beta_i$  содержит координирующий сигнал  $\gamma_i$  и сигнал связи  $\mu_i$ . Координирующие сигналы  $\gamma_i$  предписывают подмножество курсов уклонения каждого судна, обеспечивающих согласованность маневров расхождения, а сигналы связи  $\mu_i$  содержат информацию каждому судну о прогнозируемом поведении другого судна системы  $S_{12}$ , причем  $\mu_1 = \gamma_2$  и  $\mu_2 = \gamma_1$ .

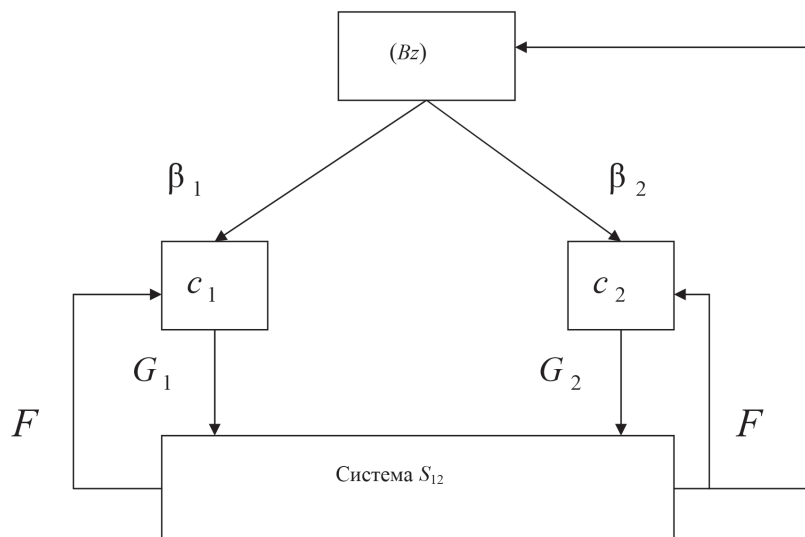


Рис. 1. Принцип локально-независимого управления системой  $S_{12}$

Координирующий сигнал  $\gamma_i$  содержит три составляющие: сигнал  $q_{1i}$  о наличии предписываемого координатором приоритета и сигналы  $q_{2i}$  и  $q_{2i'}$ , которые предписывают взаимодействующим судам возможность уклонения, соответственно, вправо и влево.

С помощью адресного сигнала  $\beta_i$  и вектора состояния  $\bar{F}$  каждое из судов  $c_i$  системы  $S_{12}$  производит выбор маневра расхождения  $G_i$  из допустимого подмножества курсов уклонения, которое регламентируется координирующим сигналом  $\gamma_i$ . Следует отметить, что судном  $c_i$  производится выбор оптимального маневра, при котором достигается экстремум выбранного критерия оптимальности. Последний выбирается в зависимости от значения реализовавшегося ситуационного возмущения, причем является различным при стандартном маневре расхождения и маневре экстренного расхождения. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работах [2], [9]. Компенсация ситуационного возмущения, применяемая в ситуации экстренного расхождения, изложена в работе [10].

Суть второго подхода состоит в полном управлении системой внешним управленцем, который наблюдает состояние системы  $S_{12}$  и в случае появления ситуационного возмущения формирует общую стратегию расхождения для обоих судов, переводя систему  $S_{12}$  в невозмущенное состояние, как показано на рис. 2.

Таким управленцем может быть как СУДС, так и что принципиально важно судовая информационная система с теми же возможностями, установленная на каждом из судов, которая решает задачу коллективной компенсации ситуационного возмущения и реализует полученную индивидуальную стратегию. Внешний управленец  $\Xi$  наблюдает вектор состояния  $\bar{F}$  системы  $S_{12}$  и производит анализ наличия ситуационного возмущения  $\dot{u}$ , при появлении которого используется оптимальная стратегия  $(G_1, G_2)$ . Маневры  $G_1$  и  $G_2$ , как показано на рис. 2, адресованы судам  $c_1$  и  $c_2$ , осуществляющих их реализацию.

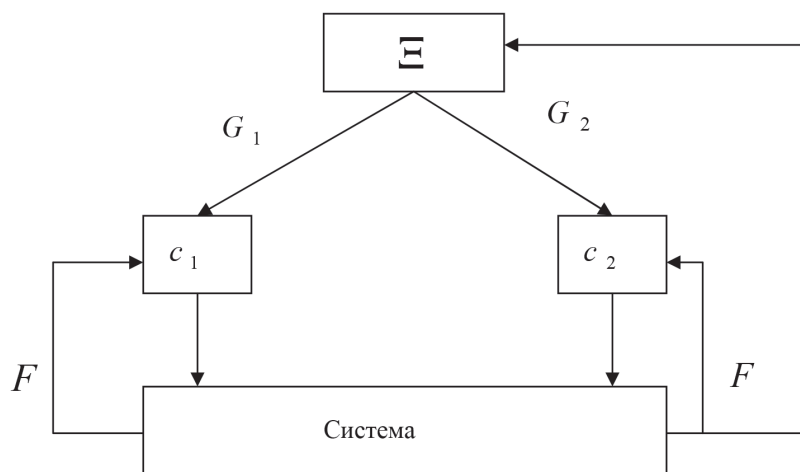


Рис. 2. Принцип полного управления системой  $S_{12}$  внешним управленцем

Достоинством полного управления системой  $S_{12}$  внешним управленцем является одинаковая интерпретация возмущенного состояния системы  $S_{12}$  при выборе маневров расхождения  $G_1$  и  $G_2$ . Компенсация ситуационного возмущения  $\omega$  производится на первом участке уклонения стратегии  $G$ . После завершения участка уклонения реализуется участок выхода на программную траекторию движения. При внешнем управлении, в случае опасного сближения, выбор стратегии расхождения производится не опасно сближающимися судами, а внешним управленцем. Поэтому в такой ситуации отсутствует система координации, регламентирующая взаимодействие опасно сближающихся судов (МППСС-72). Множество состояний системы  $S_{12}$ , как показано в работе [11], целесообразно представлять областью опасных курсов, которая отображается на расширенной плоскости курсов судов, как показано на рис. 3.

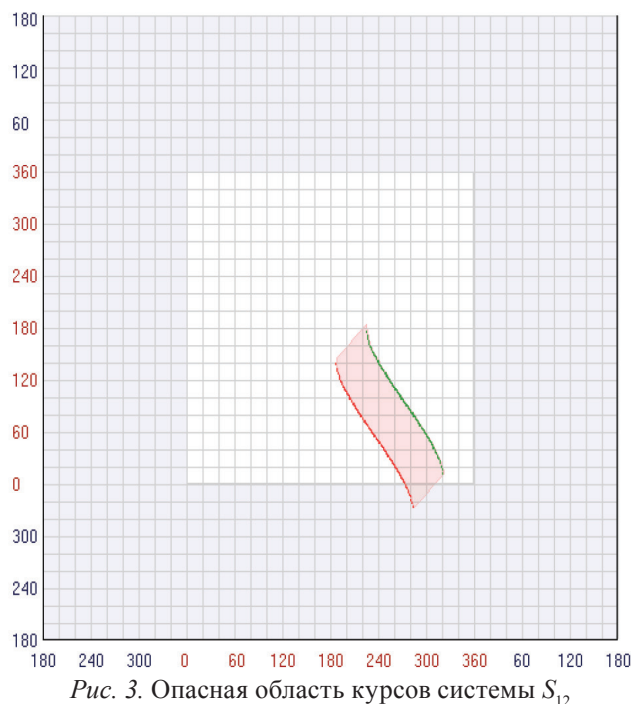


Рис. 3. Опасная область курсов системы  $S_{12}$

Границами области являются точки  $(K_1, K_2)$ , которые удовлетворяют уравнению

$$\sin(K_2 - \gamma) = \frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma),$$

где  $\gamma = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$  (здесь  $\alpha$  и  $D$  — соответственно пеленг и дистанция между судами, а  $D_d$  — предельно-допустимой дистанции сближения).

Если точка  $(K_1, K_2)$  находится внутри области опасных курсов, то дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$  меньше предельно-допустимой дистанции  $D_d$  и сближение судов является опасным. В случае положения точки  $(K_1, K_2)$  на границе или вне области опасных курсов угроза столкновения отсутствует.

Если для пары судов точка с программными курсами  $(K_{10}, K_{20})$  находится в области опасных курсов, то маневром изменения курсов судов при их неизменных скоростях необходимо изменить состояние системы  $S_{12}$ , соответствующее точке  $(K_{1y}, K_{2y})$ , которая не принадлежит области опасных курсов. При этом переход из состояния ситуационного возмущения  $(K_{10}, K_{20})$  в безопасное состояние  $(K_{1y}, K_{2y})$  требует затрат, равных минимальным изменениям курсов судов.

В случае, когда опасно сближающиеся судна не могут изменять свой курс, предупреждение столкновения возможно изменением их скоростей. В этом случае множество состояний системы  $S_{12}$  целесообразно представить областью опасных скоростей, которая аналогична области опасных курсов за исключением того, что каждой точке  $(V_1, V_2)$  парных скоростей судов соответствует дистанция кратчайшего сближения, характеризующая состояние системы  $S_{12}$ . Граница опасной области скоростей, каждая точка которой соответствует дистанции кратчайшего сближения равной предельно-допустимой дистанции, формализуется выражениями:

$$V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)}; \quad V_{1*} = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)},$$

где  $\gamma^* = \alpha - \arcsin \frac{D_d}{D}$ ,  $\gamma_* = \alpha + \arcsin \frac{D_d}{D}$ .

Очевидно, что при постоянных значениях курсов  $K_1, K_2$  и параметров  $\gamma^*, \gamma_*$  границы опасной области скоростей являются линейными. При плавании судов в стесненных водах надлежит учитывать имеющиеся в районе расхождения судов навигационные опасности. В работе [12] приведена классификация навигационных опасностей в зависимости от характера описывающих их границ, причем предлагается три типа навигационных опасностей: *точечные, линейные распределенные* и *сложные распределенные*. Учет всех трех типов навигационных опасностей при локально-независимом управлении подробно рассмотрен в работе [2], а учету линейной распределенной опасности при выборе параметров маневра расхождения, в частности, посвящена работа [13].

### Выводы

1. Отмечается, что для расхождения судов при опасном сближении, как правило, используется локально-независимое управление. В стесненных районах плавания с помощью СУДС может осуществляться принцип полного внешнего управления.

2. При локально-независимом управлении каждое судно индивидуально оценивает ситуацию сближения и принимает решение о необходимости применения маневра расхождения.

3. Для согласования маневров расхождения в случае локально-независимого управления парой судов используется бинарная система координации, определяющая взаимные обязанности судов с учетом особенностей ситуации опасного сближения.

4. Рассмотрено полное внешнее управление судами, когда в ситуации опасного сближения внешний управленец производит оценку ситуации и предписывает каждому из судов маневры расхождения, которые увеличивают дистанцию кратчайшего сближения до безопасного значения.

5. Для полного внешнего управления предложены методы выбора безопасного маневра расхождения изменением курса с помощью области опасных курсов и маневра изменением скорости при неизменных курсах судов, используя области опасных скоростей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э. Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э. Н. Пятаков, С. И. Заичко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 166–171.
2. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпи-ков. — Одесса: КП ОГТ, 2007. — 424 с.
3. Бурмака И. А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств. — 2014. — № 20. — С. 18–23.
4. Пятаков Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э. Н. Пятаков, Р. Ю. Бужбецкий, И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков. — Херсон: Гринь Д. С., 2015. — 312 с.
5. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. — 1984. — № 12. — С. 22–24.
6. Павлов В. В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения су-дов / В. В. Павлов, Н. И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. — 1985. — № 68. — С. 43–45.
7. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с нескольки-ми объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. — 1978. — № 5. — С. 35–40.
8. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущен-ко. — Одесса: Фенікс, 2013. — 180 с.
9. Сафин И. В. Выбор оптимального маневра расхождения / И. В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. — 2002. — № 7. — С. 115–120.
10. Бурмака И. А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бур-мака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. — 202 с.
11. Булгаков А. Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого ма-невра расхождения / А. Ю. Булгаков // Водный транспорт. — 2014. — № 2 (20). — С. 12–17.
12. Петриченко Е. А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Е. А. Петри-ченко // Судовождение. — 2002. — № 5. — С. 89–95.
13. Петриченко Е. А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Е. А. Петри-ченко // Автоматизация судовых технических средств. — 2003. — № 8. — С. 72–76.

## MANAGEMENT BY PAIR OF VESSELS IN SITUATION OF DANGEROUS RAPPROCHEMENT

*Two types of management by the pair of vessels in the conditions of dangerous rapprochement with the purpose of warning of their possible collision are considered. The first approach to warning of collision of vessels is the locally-independent management generally accepted in the navigator, which co-ordination of maneuvers of the interactive dangerously drawn together vessels is needed at. Therefore principle of binary co-ordination of co-operation of pair of vessels at dangerous rapprochement in the case of their locally-independent management is expounded in the article. The methods of choice of optimum strategy of divergence at this type of management are specified.*

*It is brought description over of the second approach to the management of pair of vessels in the situation of dangerous rapprochement, which is carried out by principle of complete management by the system of two dangerously drawn together vessels by external manager. For this type of management possibility of determination of safe maneuver of divergence by the change of course by the use of region of dangerous courses is examined. Possibility of safe divergence of courts by the change of speed at unchanging courses is also considered, the use of region of dangerous speeds at the set initial courses is here offered. Dignities of external management by vessels are considered and possible prospects of his use.*

*Keywords: warning of collision of vessels, types of management by vessels at dangerous rapprochement, system of binary co-ordination, region of dangerous courses and dangerous speeds of pair of ships.*

## REFERENCES

1. Pyatakov, E. N., and S. I. Zaichko. "Ocenka effektivnosti parnykh strategij raskhodjashchikhsya sudov." *Sudovozhdenie* 15 (2008): 166–171.

2. Tsimbal, N. N., I. A. Burmaka, and E. E. Tyupikov. *Gibkie strategii raskhozhdeniya*. Odessa: KP OGT, 2007.
3. Burmaka, I. A., and A. Y. Bulgakov. "Manevr raskhozhdeniya treh sudjv izminenitm kursov." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 20 (2014): 18–23.
4. Pyatakov, E. N., R. Y. Buzhbeckij, I. A. Burmaka, and A. Y. Bulgakov. *Vzaimodeystvie sudov pri raskhozhdenii dlya preduprezhdeniya stolknoveniya*. Kherson: Grin D. S., 2015.
5. Kulikov, A. M., and V. V. Poddubnyy. "Optimalnoe upravlenie raskhozhdeniem sudov." *Sudostroenie* 12 (1984): 22–24.
6. Pavlov, V. V., and N. I. Senshin. "Nekotorye voprosy algoritmtzicii vybora manevra v situacii raskhozhdeniya sudov." *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika* 68 (1985): 43–45.
7. Kudryashov, V. E. "Sintez algoritmov bezopasnogo upravleniya sudnom pri raskhozhdenii s neskol'kimi obektami." *Sudostroenie* 5 (1978): 35–40.
8. Vagushchenko, L. L. *Raskhozhdenie s sudami smeshcheniem na parallelnuyu liniyu puti*. Odessa: Feniks, 2013.
9. Safin, I. V. "Vyor optimalnogo manevra rasrhozhdeniya." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 7 (2002): 115–120.
10. Burmaka, I. A., A. I. Burmaka, and R. Y. Buzhbeckij. *Ekstrennaya strategiya rasrhozhdeniya pri chrezmernom sblizhenii sudov*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
11. Bulgakov, A. Y. "Ispolzovanie opasnoy oblasti kursov dvukh sudov dlya vybora dopustimogo manevra rasrhozhdeniya." *Vodnyy transport* 2(20) (2014): 12–17.
12. Petrichenko, E. A. "Opisanie navigacionnykh opasnostey v zadache rasrhozhdeniya sudov." *Sudovozhdenie* 5 (2002): 89–95.
13. Petrichenko, E. A. "Uchet lineynoy navigacionnoy opasnosti pri rasrhozhdenii sudov." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 8 (2003): 72–76.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурмака Игорь Алексеевич —  
кандидат технических наук, доцент.  
Национальный университет  
«Одесская морская академия»  
*burmaka-mob@ukr.net*  
Калиниченко Григорий Евгеньевич — аспирант.  
Научный руководитель:  
Бурмака Игорь Алексеевич.  
Национальный университет  
«Одесская морская академия»  
*grerory\_k@ukr.net*  
Кулаков Максим Александрович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Бурмака Игорь Алексеевич.  
Национальный университет  
«Одесская морская академия»  
*xxx.xxx3.3@ukr.net*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Burmaka Igor Alekseevich* —  
PhD, associate professor.  
National university  
"Odessa maritime academy"  
*burmaka-mob@ukr.net*  
*Kalinichenko Grigoriy Evgenevich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Burmaka Igor Alekseevich*.  
National university  
"Odessa maritime academy"  
*grerory\_k@ukr.net*  
*KulakovMaxim Alexandrovich* — postgraduate.  
Supervisor:  
*Burmaka Igor Alekseevich*.  
National university  
"Odessa maritime academy"  
*xxx.xxx3.3@ukr.net*

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 627.83

М. А. Колосов,  
А. А. Коношенков

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВОДОСБРОСА ДЛЯ СУДОХОДНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

*В статье рассматривается система судоходных гидроузлов, расположенных в каскаде канала. Указывается уязвимость близко расположенных гидроузлов при прорыве вышестоящего гидроузла. Приводится краткий обзор устройств, позволяющих производить быстрый сброс воды при переполнении водохранилища. Дается описание трубчатого водосброса с площадкой, на которой выполнена грунтовая перемычка-«пробка», обеспечивающая быстрое включение при достижении в водохранилище критического уровня воды. Исследуется фильтрационный режим грунтовой перемычки при воздействии воды. Установлены рациональный профиль грунтовой перемычки и условия её выпора, определяющие время выпора. Фильтрационный режим перемычки определяется с помощью метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Сделан вывод о возможности использования на судоходных гидроузлах новой конструкции водосброса, позволяющего избежать разрушения нижележащих ступеней каскада при чрезвычайных происшествиях в верхних ступенях каскада.*

*Ключевые слова:* судоходные гидроузлы, паводок, водосброс, грунтовая перемычка, метод ЭГДА.

### Введение

Закон о безопасности гидротехнических сооружений обязывает владельцев, а также эксплуатирующие организации выявлять возможные опасные события [1]. Наиболее опасным событием для судоходного гидроузла является прорыв напорного фронта, который может происходить через ворота шлюза или через грунтовые плотины, сопрягающие голову шлюза с береговыми откосами. В 1994 г. произошла авария на Пермских шлюзах (р. Кама). Как известно, Пермские шлюзы, построенные в 1954 г., состоят из двух ниток, при этом каждая из них состоит из шести камер, разделённых между собой откатными воротами [2]. При входе в первую камеру буксира-толкача типа «Дунайский» были разрушены ворота шлюза. При этом поток воды из камеры и верхнего бьефа разрушил остальные ворота многоступенчатого каскада. Аналогичные аварии с навалом судна на ворота происходили в 2002 г. на Сайменском канале (озеро Сайма — Выборгский залив) [3], в ноябре 2004 г. — на Константиновском шлюзе, а также на Нижне-Сви́рском шлюзе — в октябре 2001 г. [4]. Вероятности возникновения аварий на шлюзах судоходных путей России, вызванные в основном навалом судна на ворота, по данным источника [5], приведены в следующей таблице:

**Вероятность возникновения аварии для некоторых судоходных путей России**

| Наименование бассейна водных путей | Среднее число аварийных происшествий в навигацию, ед. | Вероятность возникновения аварии в шлюзе |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Канал им. Москвы                   | 9,0                                                   | 0,000095                                 |
| Волго-Балтийский                   | 4,0                                                   | 0,000057                                 |
| Волго-Донской                      | 4,0                                                   | 0,000035                                 |
| Волжский                           | 3,0                                                   | 0,000066                                 |
| Камский                            | 2,0                                                   | 0,000150                                 |
| Беломорско-Онежский                | 4,0                                                   | 0,000400                                 |

Близкое расположение друг к другу водоподпорных элементов судоходных гидроузлов приводит к постоянной зависимости от вышестоящих гидроузлов. Любой случай прорыва напорного сооружения вышестоящих гидроузлов может быть опасен для нижестоящего гидроузла. Каскад близко расположенных гидроузлов является неотъемлемой частью большинства

судоходных каналов Российской Федерации. Это и Волжский склон Волго-Донского канала, и Северный склон канала им. Москвы (рис. 1, а), и Вытегорский каскад гидроузлов Волго-Балтийского канала (рис. 1 б).

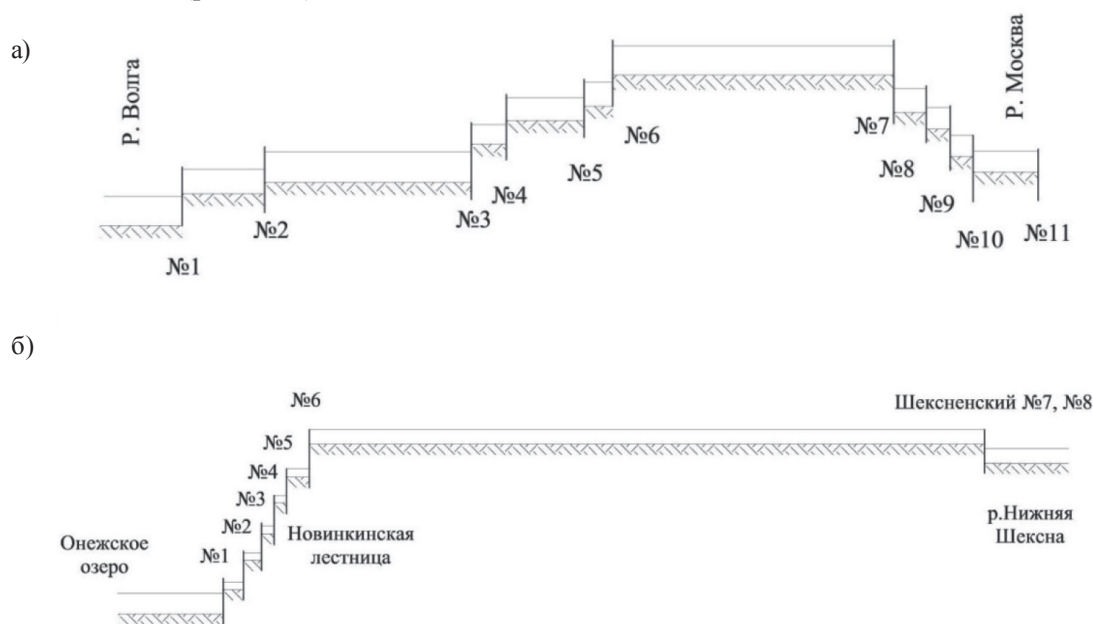


Рис. 1. Продольные профили канала им. Москвы (а) и Волго-Балтийского канала (б)

Часть аварий в шлюзах можно предотвратить с помощью современных систем защиты ворот от навала судов. Например, предложена фрикционная система, содержащая тормозные тележки на стенах камеры шлюза [6], и система заключённых в резиновую оболочку канатов, закреплённых за поворотную стойку на подвижных тележках [7]. Однако разрушение нижних ступеней каскада может произойти не только из-за навала судов на ворота, но и из-за паводков малой обеспеченности. Подход нерасчётного паводка в водохранилищах с малой площадью зеркала может привести к прорыву напорного фронта. Для поступающей сверху волны прорыва во многих судоходных гидроузлах имеется ещё один уязвимый элемент, такой как грунтовые дамбы, сопрягающие верхнюю голову шлюза с берегом. В напорных дамбах, как правило, имеются водоспуски, перекрываемые затворами. Однако их пропускная способность недостаточна, чтобы пропустить волну прорыва, которая мгновенно заполняет короткое водохранилище разделительного бьефа. Кроме того, мгновенность подхода волны прорыва исключает действие механизмов затворов открытие водосброса.

На судоходных гидротехнических сооружениях водных путей России насчитывается 115 напорных грунтовых дамб, каждая из которых может быть разрушена мгновенным паводком. Такой случай произошел на Беломоро-Балтийском канале, где паводок размыл напорную грунтовую дамбу, и поступающая через проран вода затопила машинный зал Маткожненской ГЭС [8]. Мировая практика эксплуатации грунтовых плотин подтверждает, что перелив через гребень плотин является наиболее частым случаем аварий [9]. Установлено, что среди построенных плотин высотой до 30 м пятьдесят было разрушено в результате перелива воды через гребень, при этом вероятность такого события составляет  $P = 0,0056 \%$ . В числе разрушенных плотин в этот список вошли две аварии, произошедшие на Киселёвской плотине (Свердловская область) и Тельманской плотине (Республика Башкортостан) [10].

### Основная часть

Избежать мгновенного переполнения малого водохранилища при прорыве через ворота вышележащего шлюза или из-за нерасчётного паводка можно только в том случае, если в напорном

фронте имеется водослив с автоматической системой открытия. Практика гидротехнических сооружений имеет немало конструкций таких водосливов. Например, автоматические водосбросы на судоходных гидротехнических сооружениях могут выполняться в виде сифонных водосбросов (Сайменский канал). Однако их пропускная способность рассчитана на малые объёмы сброса воды, поступающие в бьеф при шлюзовании. Пожалуй, наиболее широкое применение получила система «Гидроплюс» (Hydroplus), выполненная в виде поворотных затворов (рис. 2). В то время, когда уровни воды не являются критическими, затвор находится в устойчивом положении (см. рис. 2, поз. 1), удерживая своей массой лёгкие колебания уровней. При нерасчётных паводках начинает расти уровень воды, постепенно достигая верха затвора, где находится входное отверстие. Как только вода попадает в отверстие, увеличивается взвешивающее давление (см. рис. 2, поз. 2), а горизонтальная составляющая гидростатического давления начинает переворачивать затвор (см. рис. 2, поз. 3), тем самым позволяя пропустить через него поток воды.

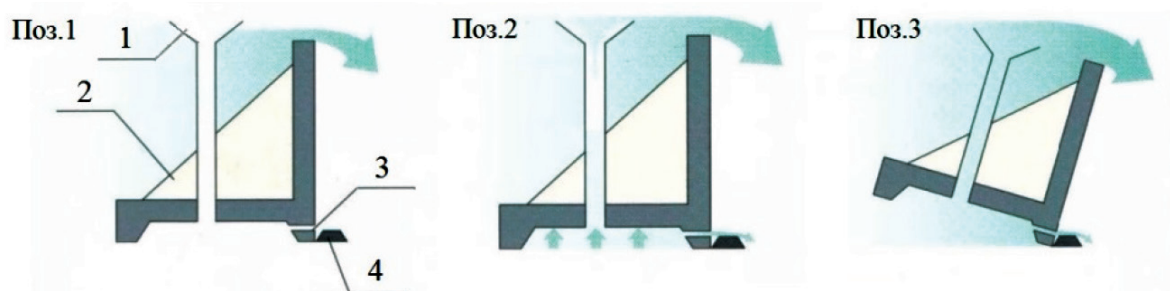


Рис. 2. Принцип работы системы Hydroplus Fusegate:  
1 — входное отверстие; 2 — балласт; 3 — дренаж; 4 — опорная балка

Мониторинг затворов системы «Гидроплюс» (Hydroplus) на Хоробровской ГЭС, продолжавшийся на протяжении восьми лет, показал, что затворы системы «Гидроплюс» (Hydroplus) работают надежно в зимних условиях, если через них нет перелива и сброса льда. Колебания уровня в верхнем бьефе не влияют на устойчивость затвора. Однако эти системы затворов располагаются, как правило, на гребне бетонных плотин. Кроме того, для системы «Гидплюс» (Hydroplus) необходим широкий фронт водослива, что приводит к уменьшению пропускной способности, согласно данным источников [11] – [13]. Также автоматический сброс воды возможен через переливную стенку (шлюзы Беломоро-Балтийского канала), однако данные устройства имеют низкую пропускную способность и требуют достаточно широких пролётов водослива. Пропускная способность стенок и затворов системы «Гидроплюс» (Hydroplus) определяется формулой

$$Q = \mu L \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $L$  — длина водосливной стенки, м;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $H$  — напор на гребне водосливной стенки, м.

Для быстрого сброса паводковой воды предлагается трубчатый водосброс с автоматической системой включения при заданном (максимальном) уровне в верхнем бьефе (рис. 3).

Предлагаемое устройство сооружается на береговом участке судоходного гидроузла или в грунтовой дамбе. Устройство включает трубопровод 1 с наклонным 2 и водовыпускным 3 отрезками. В оголовке водоприемного отрезка установлена сороудерживающая решётка 4 или щелевой водозабор. Между наклонным 2 и водовыпускным 3 отрезками трубопровода смонтирована площадка 5. Над площадкой 5 выполнено отверстие 6 для загрузки песчаной перемычки 7, закрываемое крышкой 8. Нижняя поверхность крышки 8 вплотную прилегает к песчаной перемычке 7, что создает надежную пробку для некритических напоров воды. На краю загрузочного отверстия 6 со стороны наклонного отрезка трубопровода установлена поворотная заслонка 9. На дне площадки 5 установлена решетка с геотекстилем, через которую трубопровод сообщается с дренажным колодцем 10, отводящим воду в водобойный колодец 11.

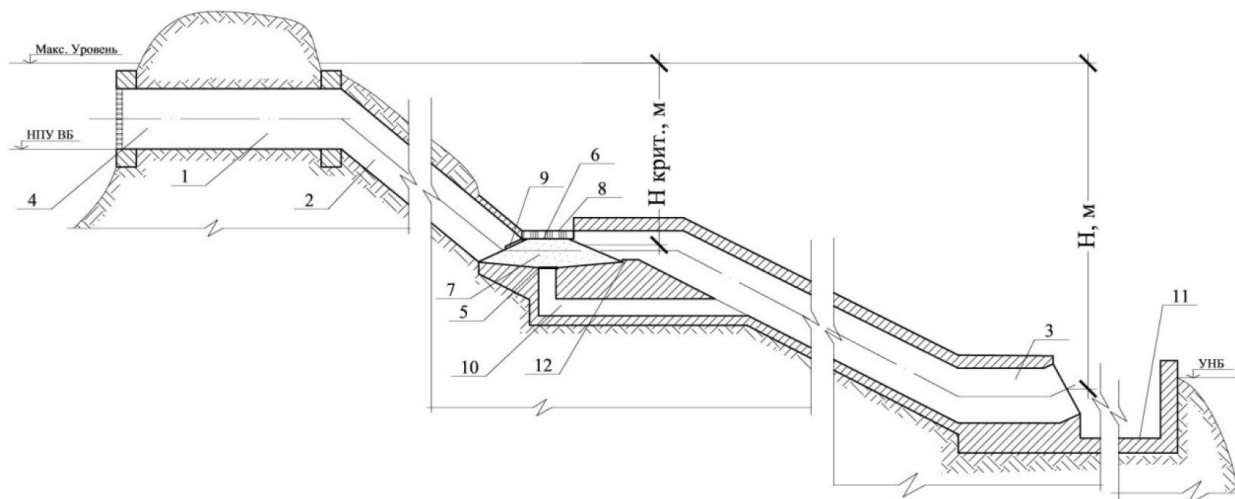


Рис. 3. Продольный профиль водосброса для судоходных гидроузлов: 1 — трубопровод; 2, 3 — соответственно наклонный и водовыпускной отрезки; 4 — сороудерживающая решетка; 5 — площадка; 6 — отверстие; 7 — песчаная перемычка; 8 — поверхность крышки; 9 — поворотная заслонка; 10 — дренажный колодец; 11 — водобойный колодец; 12 — выступ

Для обеспечения возможности устойчивого положения песчаной вставки водовыпускной отрезок трубопровода смонтирован по отношению к площадке с подъемом вверх. Такое конструктивное решение позволяет образовать в нижней части воронку, боковые стенки которой удерживают вставку от размыва при некритических уровнях воды. Кроме того, указанное положение трубопровода обеспечивает рассеивание струи в нижнем бьефе, что позволяет избежать опасных размывов дна в непосредственной близости от водовыпуска. Для обеспечения возможности использования устройства в высоконапорных сооружениях площадка смонтирована в разрыве напорного отрезка 4 трубопровода и ограничена выступом 12, расположенным перед концевой частью указанного участка.

Устройство работает следующим образом. Перед наступлением паводка в трубопровод через отверстие загружают песок, после чего его утрамбовывают и закрывают крышкой. В результате на пути водного потока образуется плотная песчаная вставка. При небольших паводках уровень воды в водохранилище поднимается выше нижнего порога уровня (НПУ), но не достигает критического значения. По мере подъема уровня воды водосброс заполняется водой. При достижении критического уровня вода, поступающая под напором в трубопровод, производит интенсивный размыв песчаного материала, освобождая устройство от песчаной вставки. Поворотная заслонка под действием потока воды поворачивается по течению, не препятствуя пропуску паводкового расхода. Пропускная способность водосброса рассчитывается по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $\omega$  — площадь живого сечения трубчатого водосброса  $\text{м}^2$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $H$  — напор воды на водосбросе, измеряемый от критического уровня воды в бьефе до центра выходного отверстия водосброса.

Интенсивный сброс начинается при критическом уровне воды и завершается при достижении проектного уровня водохранилища, после чего водосброс прекращает работу. Исследование фильтрационного режима выполнено с помощью метода ЭГДА, для некоторых профилей песчаных перемычек задаются различными геометрическими характеристиками (шириной гребня  $b_{\text{гр}}$ , высотой перемычки  $h_{\text{вст.}}$ , углом откоса). Определяют положение линий равных напоров:  $0,8h$ ,  $0,7h$ ,  $0,6h$ ,  $0,5h$ ,  $0,4h$ ,  $0,3h$ ,  $0,2h$  [14].

На рис. 4 в качестве примера показан расчёт критического напора  $H_{\text{крит}}$  для песчаной перемычки с шириной гребня 4,0 м, высотой перемычки 4,0 м и углом формирования откоса  $20^\circ$ .

После получения линий равных напоров строятся линии тока, проходящие в теле перемычки ниже поворотной заслонки 9.

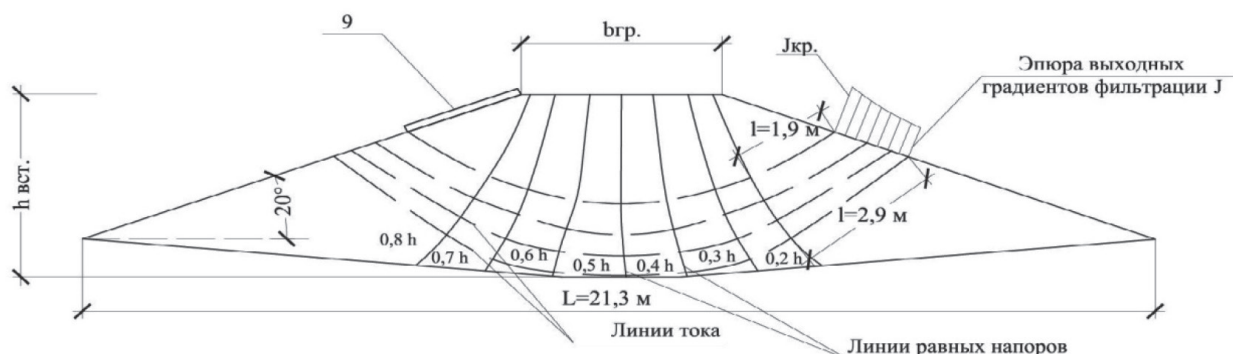


Рис. 4. Фильтрационные свойства песчаной перемычки

По линиям тока гидродинамической сетки строится эпюра выходных фильтрационных градиентов, по которой определяется критический (разрушающий) напор воды. Выходные градиенты фильтрации определяются по формуле

$$J = \frac{0,2h}{l}, \quad (3)$$

где  $l$  — длина участка линии тока между линией равного напора  $0,2h$  и линией откоса;  $J$  — выходной градиент фильтрации.

Так как необходимо найти разрушающий перемычку максимальный напор  $H_{\text{крит}}$ , зависящий от критического градиента фильтрации  $J_{\text{кр}}$ , заменяя  $h$  из формулы (3) на  $H_{\text{крит}}$ , а  $J$  на  $J_{\text{кр}}$ , получаем

$$H_{\text{крит}} = 5J_{\text{кр}}l. \quad (4)$$

Согласно СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» [15], значение критических средних градиентов напора для мелкого песка соответствуют 0,75, для среднего песка — 1,0. Таким образом, для перемычки из среднего песка критический разрушающий напор  $H_{\text{крит}}$  определяется следующим образом:

$$H_{\text{крит}} = 5 \cdot 1 \cdot 1,9 = 9,5 \text{ м}. \quad (5)$$

Для песчаной перемычки с шириной гребня 4,0 м, высотой перемычки 4,0 м и углом откоса  $20^\circ$  из среднего песка  $H_{\text{крит}} = 9,5$  м. На рис. 5 даны геометрические характеристики площадки с песчаной перемычкой для конструкции высоконапорного сооружения.

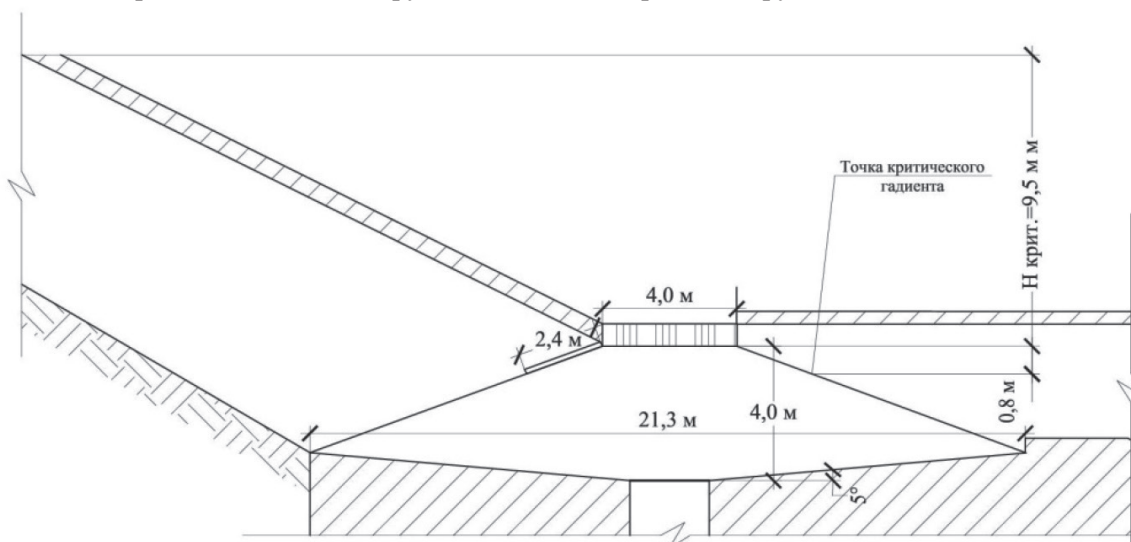


Рис. 5. Геометрические характеристики площадки с песчаной перемычкой

Таким образом, для песчаных перемычек с различными геометрическими характеристиками можно подобрать критический размываемый напор.

### Выводы

1. Установлено, что безопасность гидроузлов, близко расположенных в каскаде, зависит от событий, происходящих в вышележащем гидроузле. Наиболее опасным событием является прорыв напорного фронта вышележащего гидроузла, что может быть связано с навалом судна или нерасчётным паводком малой обеспеченности. Эти события могут вызвать цепную реакцию прорывов нижележащих гидроузлов. При паводках или аварийном сбросе вышележащего гидроузла необходимо иметь в напорном фронте «спящий» водосброс, который открывается в случае мгновенного повышения уровня воды в водохранилище. Таким водосбросом может быть трубчатый водосброс с грунтовой пробкой, разрушение которой происходит при критическом уровне воды.

2. Для расчёта условий устойчивости и выпора использованы гидродинамическая сетка фильтрации, по которой рассчитаны выходные градиенты фильтрации и определена их критическая величина. Это позволило определить оптимальные размеры грунтовой перемычки, обеспечивающие устойчивость при колебаниях уровня воды верхнего бьефа и быстрое включение водосброса при достижении критического уровня воды.

3. Для размещения данной конструкции достаточно узкого берегового участка, что позволяет расположить её на небольшом пространстве. Максимальная пропускная способность водосброса ограничивается только напором между ступенями каскада и шириной водосброса, который можно расположить на заданном участке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.07.1997 N 117-ФЗ. О безопасности гидротехнических сооружений. — М., 1997. — 8 с.
2. Есиновский В. А. Особенности определения размера вреда жизни, здоровью, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий судоходных гидротехнических сооружений / В. А. Есиновский, Г. В. Мельник, Г. Е. Шестов [и др.] // Гидротехническое строительство. — 2009. — № 6. — С. 4–10.
3. Богатырёв В. Г. Анализ воздействия судов на ворота шлюза / В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 14–17.
4. Нычик Т. Ю. Оценка риска аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19: защищена 23.12.2015 / Т. Ю. Нычик. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 21 с.
5. Нычик Т. Ю. Оценка риска аварии в результате навала судна на ворота шлюза / Т. Ю. Нычик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 2. — С. 18–23.
6. Колосов М. А. О выборе основных элементов в системе защиты ворот шлюза от навала судна / М. А. Колосов, А. А. Смирнов // Гидротехника. XXI век. — 2015. — № 2. — С. 58–61.
7. Колосов М. А. Предохранительные устройства судоходных шлюзов / М. А. Колосов, С. В. Обоймов // Гидротехника. XXI век. — 2013. — № 4. — С. 34–37.
8. Кравцов Я. Авария на карельской ГЭС: затоплен машинный зал [Электронный ресурс] / Я. Кравцов. — Режим доступа: <https://life.ru/t/%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8/99104> (дата обращения: 24.04.2016).
9. Стефанишин Д. В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2008. — Т. 251. — С. 3–9.
10. Прудовский А. М. Образование прорана при прорыве земляной плотины / А. М. Прудовский // Безопасность гидротехнических сооружений (БЭС). — М.: НИИЭС, 1998. — Вып. 2–3. — С. 67–79.

11. Луначи М. Э. Затворы системы «Гидроплюс», как фактор повышения безопасности и экономичности гидроузлов / М. Э. Луначи, Г. Ф. Онипченко, В. Б. Родионов // Безопасность энергетических сооружений. — М.: ОАО «НИИЭС», 1998. — Вып. 2 и 3. — С. 89–99.

12. Ковалев С. В. Гидравлические характеристики автоматических вододействующих затворов и оборудованных ими водосливных плотин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07: защищена 15.12.2009 / С. В. Ковалев. — М.: Моск. гос. строит. ун-т, 2009. — 24 с.

13. Classic Fusegate. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/hausse\\_classique.htm&lng=L2](http://hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/hausse_classique.htm&lng=L2) (дата обращения: 24.04.2016).

14. Чугаев Р. Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости): учебник для гидротехн. спец. вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. / Р. Р. Чугаев. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 672 с.

15. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. — М., 2012. — 87 с.

## ENGINEERING SPILLWAY CONSTRUCTION FOR NAVIGABLE HYDROSYSTEM

*The article presents navigable hydrosystem, located in the channel cascade. Shows the weakness of hydrosystems that are located close when it bursts. Overviews briefly devices, allowing to make a quick water removing when the water storage reservoir are refilled. Describes the tubular spillway with a platform that had “plug” – a ground cofferdam, that provides quick start when the water storage reservoir reaches the critical water level. The ground cofferdam seepage conditions on exposure to water are investigated. Establishes rational form of section for the ground cofferdam, conditions of its uplift defining the time of uplift. Ground cofferdam seepage conditions are defined by electric analogy method. Makes a conclusion about the possibility of using on the navigable hydrosystem the new spillway, that helps avoid the destruction of tailrace structure during emergencies in the upper development.*

*Keywords: navigable hydrosystem, flood, spillway, ground cofferdam, electric analogy method.*

## REFERENCES

1. Russian Federation. Federal law N 117-FZ. 21 July 1997. O bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij. M., 1997.

2. Esinovskij, V. A., G. V. Melnik, G. E. Shestov, A. I. Cvetkov, I. A. Sekisova, and S. Ja. Shkolnikov “Osobennosti opredelenija razmera vreda zhizni, zdorovju, imushhestvu fizicheskikh i juridicheskikh lic v rezultate avarij sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij.” *Power Technology and Engineering* 6 (2009): 4–10.

3. Bogatyrjov, V. G. “Analysis of vessels impact on lock gates.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3 (2011): 14–17.

4. Nychik, T. Ju. Ocenka riska avarij i transportnyh proisshestvij v sudohodnyh shljuzah: Abstract of PhD diss. SPb.: Gos. un-t mor. i rechnogo flota im. S. O. Makarova, 2014.

5. Nychik, T. Ju. “Defining the risk of accident as a result of ship impact on lock gate.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2012): 18a–23.

6. Kolosov, M. A., and A. A. Smirnov. “O vybore osnovnyh jelementov v sisteme zashhity vorot shljuzy ot navala sudna.” *Gidrotehnika. XXI vek* 2 (2015): 58–61.

7. Kolosov, M. A., and S. V. Obojmov. “Predohranitelnye ustrojstva sudohodnyh shljuzov.” *Gidrotehnika. XXI vek* 4 (2013): 34–37.

8. Kravcov, Ja. Avarija na karelskoj GJeS: zatopen mashinnyj zal. Web. 24 April 2016 <<https://life.ru/t/%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8/99104>>.

9. Stefanishin, D. V. “Breakdown forecast of the designing and constructing dams using the statistical analysis results of the previous breakdowns.” *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva* 251 (2008): 3–9.

10. Prudovskij, A. M. “Obrazovanie prorana pri proryve zemljanoj plotiny.” *Bezopasnost gidrotehnicheskikh sooruzhenij (BJeS)*. Vol. 2–3. M.: NIIJeS, 1998: 67–79.

11. Lunaci, M. Je., G. F. Onipchenko, and V. B. Rodionov. “Zatvory sistemy «Gidropljus», kak faktor povyshenija bezopasnosti i jekonomichnosti gidrouzlov.” *Bezopasnost jenergeticheskikh sooruzhenij*. Vol. 2–3. M.: ОАО «НИИЭС», 1998: 89–99.

12. Kovalev, S. V. *Gidravlicheskie harakteristiki avtomaticheskikh vododejstvujushhih zatvorov i oborudovannyh imi vodoslivnyh plotin: Abstract of PhD diss.* M.: Mosk. gos. stroit. un-t, 2009.
13. Classic Fusegate. Web. 24 April 2016 <[http://hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/hausse\\_classique.htm?lng=L2](http://hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/hausse_classique.htm?lng=L2)>.
14. Chugaev, R. R. *Gidravlika (Tehn. mehanika zhidkosti): Ucheb. dlja gidrotehn. spec. vuzov.* L.: Jenergoizdat, 1982.
15. Russian Federation. Set of rules SP 39.13330.2012. Plotiny iz gruntovyh materialov. M., 2012.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Колосов Михаил Александрович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Коношенков Александр Алексеевич* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Колосов Михаил Александрович.*  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*a.konoshenkov@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kolosov Mihail Aleksandrovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_gsk@gumrf.ru*  
*Konoshenkov Aleksandr Alekseevich* — Postgraduate.  
Supervisor:  
*Kolosov Mihail Aleksandrovich.*  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*a.konoshenkov@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.*

**УДК 656.6; 626.02**

**К. П. Моргунов**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА В ОСНОВАНИИ И ЗАСЫПКЕ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

*Рассмотрена проблема адекватного выбора исходных данных при формулировании математической модели расчета напряженно-деформированного состояния конструкций судоходных шлюзов. При таких расчетах в качестве исходных данных принимаются характеристики окружающего грунта. Информация об этих характеристиках обычно может быть получена из материалов проекта сооружения. Существующие в России судоходные гидротехнические сооружения проектировались и строились много лет назад. На примере определения характеристик грунтов в засыпке камер шлюзов на двух гидроузлах ФБУ «Волго-Дон», выполненных через несколько лет эксплуатации, исследовано, как в процессе строительства и эксплуатации изменяются характеристики грунтов, окружающих сооружение. Определено, что на свойства грунта оказывают существенное влияние как процесс организации строительных работ по формированию массива засыпки, так и режимы последующей эксплуатации сооружения.*

*Ключевые слова: судоходный шлюз, напряженно-деформированное состояние конструкций, свойства грунтов, разуплотнение грунта.*

#### **Введение**

Для оценки прочности, устойчивости и долговечности конструкций судоходных шлюзов (камер и устоев голов) принято проводить расчеты напряженно-деформированного состояния этих конструкций [1], [2]. Виды исходной информации для подобных расчетов:

– конструкция и геометрические размеры камеры шлюза;

- схема армирования, характеристики бетона и арматуры железобетонных конструкций камеры;
- характеристики грунтов основания камеры и обратных засыпок за стенами расчетных секций камеры.

Очевидно, что от точности исходных данных и их близости к реальным условиям строительства и функционирования сооружения зависит адекватность математической модели и соответствие результатов, полученных с её использованием, фактическому состоянию конструкций. При этом необходимо решать задачу о совместной работе и взаимных деформациях сооружения и его основания, что само по себе представляет весьма сложную задачу. Ошибки в адекватном выборе реальных характеристик материалов могут привести к тому, что получаемые в процессе расчетов результаты не будут соответствовать действительным деформациям и перемещениям конструкций.

Как правило, практически единственным источником информации о характеристиках сооружения и окружающего грунта являются проектные материалы гидроузлов, ведь получить данные о характеристиках бетона и арматуры стен камеры по прошествии значительного количества лет после его укладки можно только весьма трудоемким способом — выбуриванием кернов и изучением их характеристик. Еще сложнее обстоит дело с характеристиками грунтов. В процессе строительства и последующей эксплуатации судоходного шлюза грунты основания и боковых засыпок подвергаются разнообразным динамическим (меняющимся во времени) нагрузкам [3]. Вес шлюза, а значит, и нагрузка на грунт основания в процессе наполнения / опорожнения периодически значительно изменяются. При наполнении камеры её стены отклоняются в сторону засыпки, при опорожнении — возвращаются обратно. Помимо этого, имеют место сезонные температурные перемещения стен камеры, их деформация за счет неравномерного прогрева лицевой стороны стены и стороны, обращенной в сторону грунта. После строительства гидроузла и создания напорного фронта существенным образом изменяется фильтрационный режим в основании и боковых засыпках камер шлюзов, и, соответственно, характеристики грунтов, прежде всего, их влажность. Поэтому получение исходных данных для математического моделирования представляет собой достаточно сложную задачу с большим числом неопределенностей.

На примере исследования данных о грунтах основания и засыпки шлюзов, полученных при выполнении научно-исследовательских работ на гидроузлах ФБУ «Администрация Волго-Донского бассейна внутренних водных путей», можно увидеть, какие неожиданности ждут исследователей при попытке идентификации характеристик грунтов.

#### **Оценка состояния грунтового массива в основании и засыпке сооружений гидроузла шлюза № 5 и Волгоградского гидроузла ФБУ «Волго-Дон»**

В 2007 – 2008 гг. выполнялась работа по исследованию прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходной камеры, а также устойчивости грунтовой дамбы, формирующей напорный фронт гидроузла шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала [4]. Проблема заключалась в том, что начиная с 2005 г. осадки и горизонтальные перемещения конструкций камеры и до того существенные, однако не превосходившие предельно-допустимых значений (ПДЗ) в 1 мм/год, стали приобретать скачкообразный резко нарастающий характер. Особенно это проявилось для центральных секций камеры — четвертой и пятой (камера состоит из семи секций). Средняя интенсивность осадки для четвертой секции по левой стороне составила 4,98 мм/год, по правой стороне 6,38 мм/год, а для пятой секции по левой стороне 4,72 мм/год и по правой стороне 2,94 мм/год, что значительно превосходит величину ПДЗ.

Изучение проектных материалов по гидроузлу показало, что свойства грунтов основания камеры шлюза № 5 изначально характеризовались низкими прочностными показателями и высокой сжимаемостью под нагрузкой [5]. В основании голов и камеры шлюза на всем протяжении залегали легкие водоносные супеси нижнебакинского горизонта, близкие по составу к глинистым пескам и содержащие на различной глубине мелкие линзочки глины и тяжелых супесей. Мощность супесей составила 6 – 8 м, мощность линзочек — от 0,2 до 2,0 м. Ниже подошвы камеры на отметке

9,60 – 11,55 м пески подстилаются нижнебакинскими мягкопластинчатыми глинами. Нижнебакинский горизонт подстилается легкими и тяжелыми суглинками андреевской свиты, под ними — легкие и средние супеси и легкие суглинки онкофорового горизонта. Водоупором для них являются мощная пачка глин в основании онкофорового горизонта и глины майкопской свиты (рис. 1 и 2).

По проектным данным грунты, залегающие непосредственно в основании камеры, характеризуются весьма высокими водопропускными свойствами. Коэффициенты фильтрации составляют: для разнородных песков аллювия  $K_f = 0,0109$  см/с (9,35 м/сут), для мелкозернистых пылеватых песков  $K_f = 0,0033$  см/с (2,9 м/сут). Водопроницаемость супеси нижнебакинского горизонта определяется коэффициентом фильтрации  $K_f = 0,00052$  см/с (0,45 м/сут).

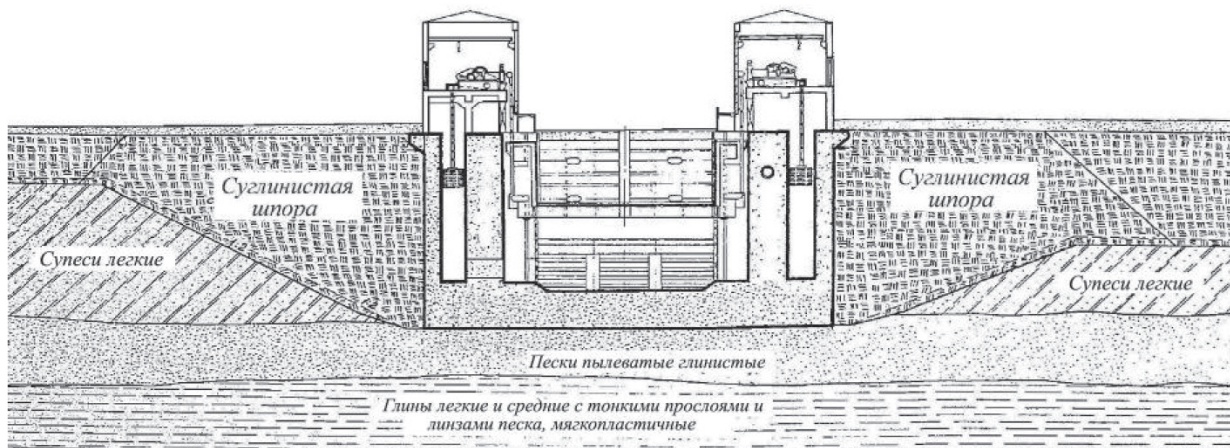


Рис. 1. Поперечный разрез гидроузла по верхней голове

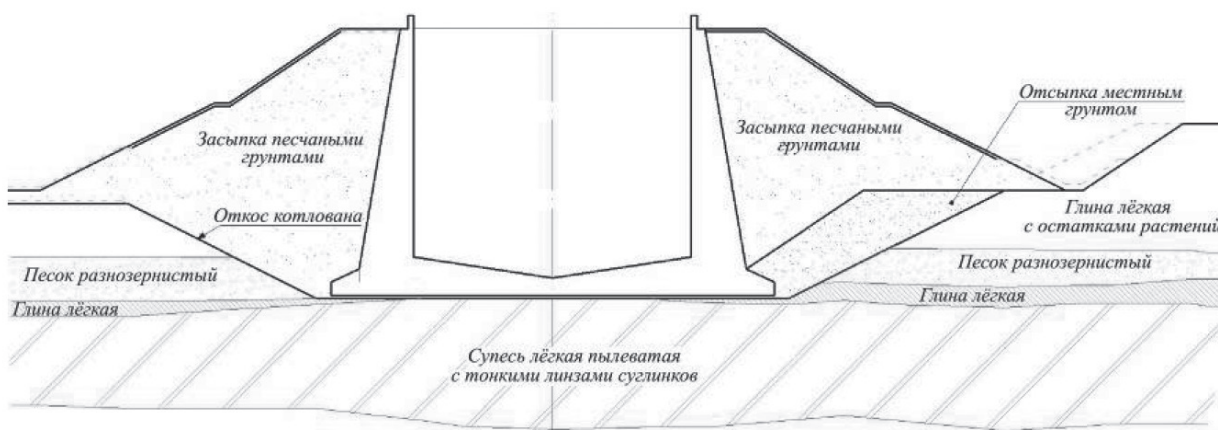


Рис. 2. Поперечный разрез по секции камеры

Слабость и неустойчивость грунтов основания проявилась уже на этапе строительства гидроузла. Проходка котлована сопровождалась крупными оползнями и обвалами земляных масс. Для обеспечения устойчивости откосов принимались специальные меры, из строительного котлована осуществлялся постоянный водоотлив системой глубинных трубчатых колодцев и иглофильтров.

Высотные марки и щелемеры на конструкциях голов и камеры были установлены ещё в период строительства. Это позволило зафиксировать осадки и перемещения элементов шлюза до момента его пуска в эксплуатацию с весны 1952 г. Как показали натурные наблюдения, до затопления камеры водой осадки верхней головы составили 50 – 80 мм, нижней головы — 60 – 70 мм, а секций — в пределах 45 – 55 мм. После затопления камеры водой в течение первых трех лет эксплуатации (1952 – 1955 гг.) произошли дополнительные осадки голов и секций шлюза порядка 100 – 110 мм. В период последующей эксплуатации шлюза происходило медленное нарастание

осадок, которые не превосходили значений 1 мм/год. Однако с 2005 г. произошло увеличение осадок центральных секций шлюза (секции IV и V) [4]. Эти аномальные перемещения были связаны, по всей видимости, с изменением грунтовых условий в основании секций.

Как показали обследования камеры, осушенной в межнавигационный период 2006 – 2007 гг., продольная шпонка в днище шлюза в районе секции IV оказалась нарушена, что привело к проникновению воды из камеры шлюза в грунт под днищем шлюза и последующей суффозии мелкозернистого песка и супеси из основания. На дне камеры в районе шва между секциями IV и V обнаружены наносы (контактный выпор), по-видимому, суффозионный вынос частиц грунта через нарушенный разделительный деформационный шов между секциями. Такой суффозии существенно способствует режим работы шлюза, обусловленный регулярным наполнением и опорожнением камеры. В соответствии с паспортом шлюза наполнение и опорожнение камеры занимает менее 10 мин, при этом напор меняется примерно на 9,5 м. Иными словами, цикл наполнение / опорожнение может рассматриваться как своеобразный «насос», создающий, при наличии гидравлической связи между камерой шлюза и водонасыщенным основанием, значительные фильтрационные градиенты в грунтах основания секций IV и V, превосходящие их критические значения ( $J_{cr.m} = 0,32$  для мелкозернистых песков). Проникновение воды из камеры шлюза в грунт основания и последующая суффозия грунта с перемещением его в массиве основания оказывают существенное влияние на характеристики грунта, в том числе на его несущую способность.

Для подтверждения этой гипотезы было проведено георадарное обследование грунтов основания камеры [6], [7]. Было выполнено три геоэлектрических разреза вдоль по длине камеры (один — по оси камеры, и два — у стен), а также по два продольных разреза по грунтам засыпки, слева и справа от камеры шлюза. Кроме того, было выполнено семь поперечных разрезов по длине камеры. Таким образом, были обследованы грунты под камерой и засыпкой вплоть до дренажных ванн гидроузла. Исследования показали, что в грунте основания камеры шлюза под секциями III – V имеется зона разуплотнения грунтов (рис. 3). Понятие «зона разуплотнения» в терминах георадарных исследований означает, что грунт в этих зонах однозначно менее плотен, чем в окружающих слоях.

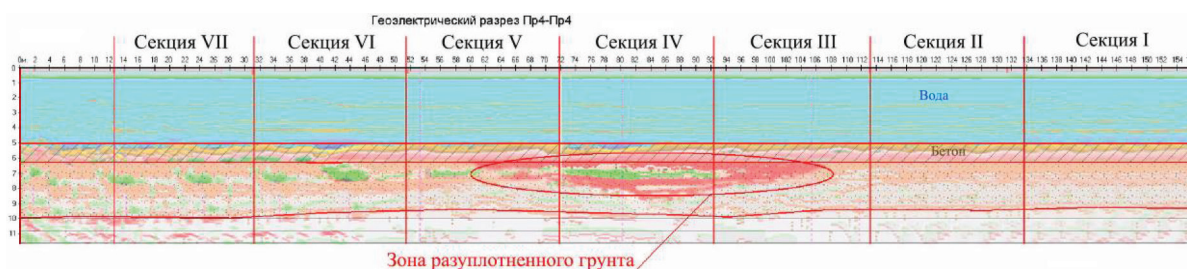


Рис. 3. Геоэлектрический разрез грунта вдоль оси камеры

Зона разуплотненного грунта была зафиксирована также на разрезе, построенном в основании обратной засыпки с левой стороны камеры. Кроме того, на поверхности обратной отсыпки в районе стыка секций IV и V визуально наблюдался *грифон* — выход воды. Что же послужило причиной изменения свойств грунтов основания камеры, приведших к сверхпроектным осадкам и, как следствие, к разрушению шпонки в деформационном шве и проникновению воды из камеры в массив грунта? Ведь для того, чтобы характеристики грунтов в основании камеры (в частности, их насыщенность водой) не создавали угрозы устойчивости конструкции, был спроектирован и реализован напорный фронт гидроузла, состоящий из верхней головы и грунтовой дамбы, двумя крыльями (левым и правым) соединяющей верхнюю голову шлюза с откосами речной долины. Георадарные исследования дамбы дали ответ на этот вопрос.

Конструкция дамбы предполагала наличие в толще её тела глиняного ядра, которое должно было служить противофильтрационной защитой от проникновения в грунты основания камеры шлюза воды из верхнего бьефа гидроузла (рис. 4).



Рис. 4. Поперечный разрез левого крыла дамбы

Длина левого крыла дамбы составляет около 70 – 75 м, на нем было выполнено три геоэлектрических разреза по гребню (со стороны верхнего бьефа, по оси и со стороны нижнего бьефа) и один разрез — в основании дамбы со стороны нижнего бьефа. На гребне правого крыла дамбы длиной около 100 м было сделано два разреза: со стороны верхнего бьефа и по оси. Георадарные разрезы по крыльям дамбы выявили следующее. Верхний слой грунтов дамбы толщиной до 1,0 м по всем разрезам представляет собой насыпные грунты частично с асфальтовым покрытием. Ниже до глубины 8,0 м находятся глинистые грунты, составляющие ядро дамбы. При этом на левом крыле дамбы на расстоянии от 10 до 50 м от берега долины зафиксированы разуплотнения по всем разрезам (рис. 5).

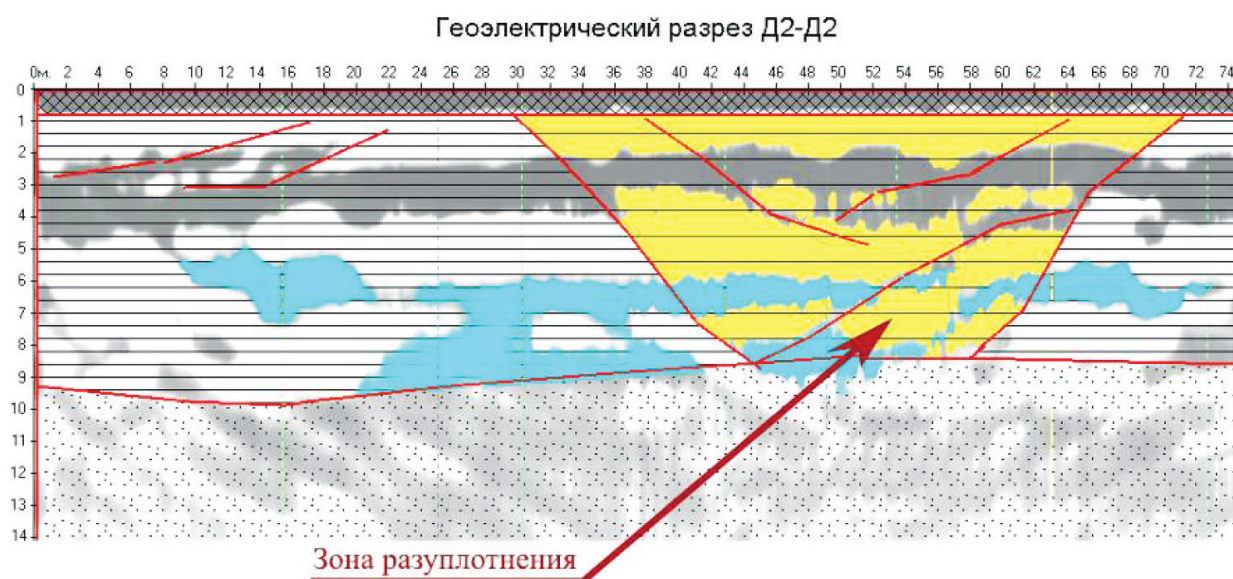


Рис. 5. Геоэлектрический разрез грунта вдоль оси грунтовой дамбы

Разуплотнения располагаются по всей глубине дамбы от 1,0 до 8,0 м, т. е. в этих местах, составляющих по протяженности около 50 % длины дамбы, глиняное ядро практически отсутствует. При этом с глубины около 5,0 м водонасыщенные грунты тела дамбы имеют непосредственную гидравлическую связь с грунтами основания дамбы, а следовательно, и с грунтами основания камеры шлюза. Зафиксирован также выход грунтовых вод на поверхность низового откоса в основании левого крыла дамбы. В правом крыле дамбы глинистое ядро наблюдалось по всей протяженности без разрывов и разуплотнений. Таким образом, из-за частичного разуплотнения напорного фронта гидроузла вода из верхнего бьефа имела возможность поступать через левое крыло дамбы в грунты основания камеры. Это изменяло водонасыщенность этих грунтов, их прочностные характеристики, способствовало процессам суффозии — выноса частиц грунта из основного мас-

сива. Постепенные качественные изменения характеристик грунтов продолжались, по-видимому, до начала 2000-х гг., когда и произошло достаточно резкое изменение характера осадок конструкцией шлюза. При этом разные секции камеры перемещались по-разному, что и привело к разрушению уплотнительной шпонки в районе IV секции камеры. После этого через разрушенную шпонку при наполнении камеры происходило поступление воды из камеры в грунт, а при опорожнении камеры весьма водонасыщенный грунт (легкая пылеватая супесь с водой, практически пульпа) проникал в камеру.

Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций камеры, выполненные с использованием проектных характеристик грунтов, не дали ответа на причины ненормативных осадок секций камеры шлюза (рис. 6, а). И лишь введение в математическую модель при описании геометрии грунтового массива в районе стыка двух полусекций камеры полости с характеристиками, отличными от характеристик остального массива (рис. 6, б), позволило получить качественные результаты, соответствующие наблюдаемым процессам перемещения конструкций [8].

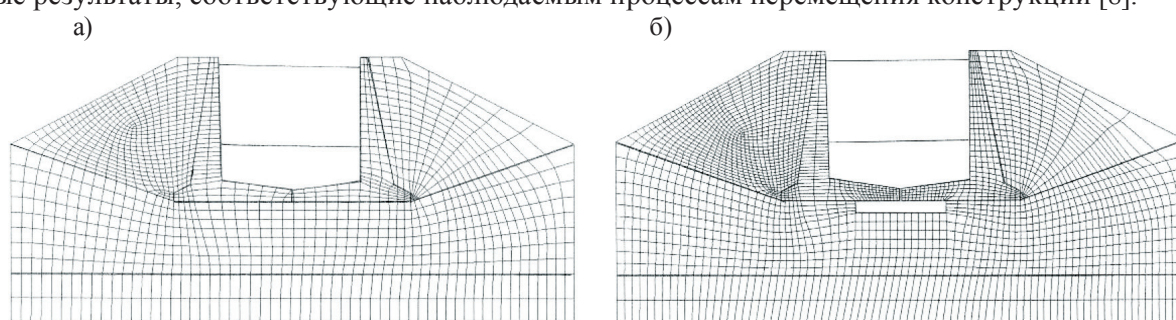


Рис. 6. Конечно-элементная схема разбиения расчетной области:  
а — сплошной массив грунта в основании; б — полость в районе оси камеры

Ещё одним примером сравнения реальных характеристик грунтов с проектными является исследование состояния конструкций судоходных шлюзов № 30 и 31 Волгоградского гидроузла [9]. Сооружения Волгоградского гидроузла вступили в строй в 1959 г. При строительстве в научно-исследовательских целях одна из секций верхней камеры шлюза № 31 была оснащена закладной контрольно-измерительной аппаратурой, предназначенной для изучения температурного режима бетона, отклонения стен, раскрытия блочного шва, давления грунта засыпки и напряжённого состояния арматуры.

Для контроля работы закладных приборов и исследования характеристик грунтов обратной засыпки камеры в 1976 г. (через 17 лет после начала эксплуатации) вдоль тыловой части стены камеры был пройден так называемый *малый шурф*, имевший глубину 9 м. Поверху шурф имел размеры в плане  $4,20 \times 1,50$  м, в основании, из-за наклона тыловой грани, его размеры были  $2,10 \times 1,50$  м. Для того, чтобы оценить свойства грунта засыпки непосредственно у стенки и на некотором расстоянии от нее, пробы отбирались в двух створах, через метр по глубине засыпки. Для обеспечения большей достоверности результатов на каждом ярусе в каждом створе отбиралось по три пробы. По каждой из них определялись плотность и влажность грунта, кроме того, во всех ярусах отбирались пробы для проведения компрессионных и сдвиговых испытаний. Из архивных материалов (данных лабораторного анализа грунтов, использовавшихся при засыпке пазух во время строительства) следовало, что засыпка выполнялась мелкозернистым кварцевым песком, грунт по всей глубине засыпки был однородным, начальная плотность его составляла  $1,58 \text{ г/см}^3$ .

Данные, полученные при проходке шурфа, показали, что за 17 лет эксплуатации плотность грунта в верхней зоне засыпки (до глубины 6 – 7 м) уменьшилась, причем наиболее существенно непосредственно у тыловой грани стенки. Величина разуплотнения была достаточно значительной и составила  $0,1 \text{ г/см}^3$ , что в долях относительной плотности составляет около 30 %. При этом в верхней части стенки за период эксплуатации также изменилась и влажность грунта. Непосредственно у тыловой грани она снизилась с 7 – 8 % до 4 – 5 %. В лабораторных условиях были

также определены предельные значения плотностей грунта. Оказалось, что плотность скелета в предельно плотном состоянии —  $1,65 \text{ г/см}^3$ , в предельно рыхлом —  $1,32 \text{ г/см}^3$ . Для объяснения причин такой неоднородности грунта была рассмотрена гипотеза о том, что при циклических перемещениях стенки в результате наполнений — опорожнении камеры и в результате её сезонных температурных деформаций в верхней части засыпки происходило не уплотнение грунта, как это можно было предположить, а, наоборот, разуплотнение. Гипотеза проверялась при лабораторных исследованиях в лотке с качающейся подпорной стенкой. Проведенные исследования показали, что если обратная засыпка выполнена из грунта с достаточно большой относительной плотностью ( $D \leq 0,75$ ), то при небольших по величине, но многочисленных циклических смещениях стенки на грунт (что моделирует смещения стенки камеры при наполнении / опорожнении шлюза) в верхней зоне засыпки происходит разуплотнение грунта. Если грунт уложен со средней плотностью, то разуплотнения не наблюдается.

Анализ архивных материалов по организации строительных работ показал, что обратная засыпка верхней камеры шлюза № 31 в пределах исследуемой секции проводилась в период с декабря 1958 г. по ноябрь 1959 г. Засыпка выполнялась мелкозернистым кварцевым песком, укладываемым послойно с уплотнением виброкатками в рассматриваемой зоне шурфа. На основании этих данных можно констатировать, что в верхней части засыпки грунт был уложен с очень большой плотностью, относительная плотность которого была близка к 0,9. Именно поэтому, как подтвердили лабораторные опыты, и произошло разуплотнение грунта при циклических смещениях стенки.

В 1981 г. в этом же месте был пройден «большой» шурф глубиной 20 м, при проходке которого также исследовались свойства грунта [10]. Шурф имел в основании размеры  $2,5 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$ , а поверху  $7,6 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$ . Так как шурф проходил до глубин ниже уровня грунтовых вод, для его защиты планировалось замораживание грунта на глубину 25 м. Для этого по проекту предусматривалось бурение 18 скважин, из которых 16 были замораживающими. Однако, фактически, сложные условия примыкания шурфа к бетонной стенке камеры вызвали необходимость бурения дополнительных замораживающих скважин. В итоге всего было пробурено 37 скважин, из них 34 замораживающих. Шаг скважин в среднем составлял 1,5 м, фактическая глубина — 26 м. После завершения буровых работ был выполнен монтаж «рассольной» сети и установлены замораживающие станции. Отбор тепла от пород осуществлялся хладоносителем — водным раствором хлористого кальция, который охлаждался до температуры  $-20^\circ\text{C}$  в испарителях замораживающей станции. Радиус замораживания каждой колонки составлял 2,5 м, общая толщина льдопородного ограждения должна была составить 3,4 м.

Процесс активного замораживания грунта начался, когда глубина шурфа достигла отметки грунтовых вод в незамерзшем грунте. Полное промораживание грунта в шурфе было достигнуто, когда шурф был разработан до отметки 6,0 м. После этого разработку грунта пришлось вести с помощью отбойных молотков и электролома. В процессе проходки шурфа в грунте засыпки отбирались пробы на плотность и влажность, пробы отбирались через один метр по глубине в двух сечениях: непосредственно у тыловой грани стенки и у противоположной стенки шурфа. Все пробы отбирались по три раза, полученные характеристики осреднялись. Поскольку одной из задач устройства шурфа была проверка достоверности показаний закладных приборов, в процессе проходки с помощью специального градуировочного устройства были выполнены контрольные градуировки закладных грунтовых динамометров [11]. Кроме того, в процессе проходки и засыпки грунта вдоль стенки шлюза велись регулярные наблюдения за температурой в бетоне, температурой в грунте и напряжениями в тыловой арматуре стенки.

После завершения работ по проходке и выполнения всего исследовательского комплекса была проведена послойная засыпка шурфа с уплотнением. При засыпке использовался тот же самый грунт, при укладке обеспечивалась однородная плотность грунта, соответствующая средней плотности грунта засыпки.

Результаты исследований показали следующее. По архивным данным, полученным лабораторными методами на момент строительства, в пределах верхних 10 м плотность грунта в среднем

составила около  $1,60 \text{ г/см}^3$ , влажность песка — 5 – 8 %. Отобранные в шурфе пробы показали, что по прошествии более 20 лет эксплуатации плотность грунта в верхней зоне засыпки (в пределах 10 м) значительно снизилась до величины в среднем  $1,53 \text{ г/см}^3$ . Причем это было среднее значение. На расстоянии трех и более метров от стенки снижение плотности было менее существенным — в пределах  $0,02 - 0,03 \text{ г/см}^3$ . Влажность грунта по сравнению с начальной также снизилась (непосредственно у стенки по большинству проб она не превышала 5 %, а на расстоянии 5 – 7 м была в пределах 5 – 6 %).

Хотя средняя плотность засыпки в верхней зоне была примерно одинаковой, тем не менее, подробное исследование грунта по высоте засыпки показало значительную неравномерность плотностей. Так, относительная плотность отдельных слоев колебалась в пределах от 0,45 до 0,95, т. е. от почти предельно рыхлого сложения до предельной плотности. Такое различие, безусловно, определялось неудовлетворительным качеством выполнения работ при возведении обратных засыпок. Примером небрежного выполнения работ явилось обнаружение при проходке шурфа на разной глубине засыпки стальной трубы диаметром 500 мм, металлической лестницы, слоя щебня толщиной 5 см, двух глинистых прослоев и на нижних отметках — строительного мусора. И это все было обнаружено в створе исследовательской секции, где контроль за качеством работ должен был быть более тщательным, чем в остальных секциях.

Исследования свойств грунта непосредственно в зоне приборов выявили ряд удивительных особенностей. Так, например, мембрана грунтового динамометра в верхней группе приборов была закрыта корнем растущего в засыпке кустарника, в зоне тангенциальной установки плотность грунта была около  $1,44 - 1,46 \text{ г/см}^3$ . Наибольшая плотность грунта была выявлена в зоне приборов, установленных на отметке 5,2 м, которые при работе фиксировали самые большие давления грунта. При проходке шурфа непосредственно под этими приборами (ниже на 20 – 30 см) был обнаружен сплошной по площади всего шурфа глинистый прослой толщиной около 0,5 см. Этот прослой мог образоваться при засыпке в результате попадания в котлован воды и отстоя её с выпадением в осадок глинистых наносов. Из-за слабой водопроницаемости этого прослоя выше него грунт на высоту 60 см имел влажность около 24 % и относительную плотность  $D = 0,95$ , т. е. близкую к предельно плотному сложению. В то же время грунт, лежащий непосредственно под глинистым прослоем, имел влажность 5 – 6 % и относительную плотность около 0,6. Таким образом, если приборы этой группы показывали достоверные результаты, то полученные по ним значительные величины давления можно распространить только на толщину слоя, где выявлена такая высокая плотность грунта, т. е. на высоту 60 см. Второй выявленный прослой глины располагался на отметке 0,9 м и был выше группы датчиков, установленных на отметке 0,7 м. В его зоне также было выявлено изменение плотности. Так, если грунт над прослоем имел плотность  $1,60 - 1,62 \text{ г/см}^3$ , то ниже прослоя на уровне грунтовых динамометров плотность была в пределах  $1,52 - 1,54 \text{ г/см}^3$ .

В результате проведения исследований оказалось, что в отличие от проектных решений грунты в пазах камер уложены с неравномерной плотностью по глубине. Наибольшая плотность была выявлена в верхней зоне засыпки, где плотности близки к предельным значениям, однако непосредственно вблизи стенки в результате ее циклических перемещений грунт разуплотнился. В нижней зоне засыпки грунты недоуплотнены и в теле имеется большое количество посторонних включений: мусора, щебня и т. д., непосредственно около стенки грунт разуплотнен в результате ее циклических перемещений. На двух уровнях засыпки выявлены два прослоя глинистого материала, наличие которых обусловило значительные боковые давления на стенку в этих зонах.

### Заключение

Приведенные примеры показывают, насколько значительно могут изменяться свойства грунта в процессе строительства и функционирования гидротехнических сооружений по сравнению с проектными. При этом, как показали исследования, весьма существенным условием является правильная организация строительства, прежде всего, процессов обратной засыпки и формирования грунтового массива вокруг сооружений. Засыпку необходимо проводить однородным

грунтом, при этом не достигая максимального уплотнения грунта. Переменная нагрузка на слои грунта, непосредственно прилегающие к стенам камеры, перемещающимся в процессе наполнения / опорожнения, а также при сезонных перемещениях, вызывает разуплотнение грунтов, уложенных с высокой относительной плотностью, а при средних относительных плотностях грунтов разуплотнения не происходит.

Весьма существенным фактором является также обеспечение необходимого (проектного) фильтрационного режима в грунтах основания и засыпки конструкций шлюза. Сам по себе судходный шлюз является напорным гидротехническим сооружением, разделяющим бьефы с различными уровнями воды. Это создает предпосылки для значительного изменения характера перемещения грунтовых вод по сравнению с фильтрацией в ненарушенном грунте. При этом важной задачей является формирование и поддержание напорного фронта, обеспечивающего необходимую степень гашения напора. При условии наличия в основании голов и камеры шлюза слабых грунтов (шлюз № 5 ВДСК), возможно, устройство малопроницаемого (глиняного) ядра в напорной дамбе недостаточно для обеспечения требуемого гашения напора, необходимо устройство шпунтовой стенки. Однако этот вопрос требует дальнейшего исследования.

И, конечно, важен контроль качества проведения строительных работ. Так, например, отсутствие глиняного ядра в значительной части левого крыла дамбы на гидроузле шлюза № 5 Волго-Донского канала может быть объяснено, в том числе и некачественным выполнением работ по формированию этой дамбы. Наличие значительного количества строительного мусора в грунтовой засыпке, обнаруженное при проходке шурфов на Волгоградском гидроузле, привело к формированию существенной неоднородности грунта, что, в свою очередь, повлияло на показания закладных приборов. Понятно, что все эти обстоятельства серьезным образом влияют на результаты расчетов параметров конструкций сооружения, получаемые при математическом моделировании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голоскоков Д. П. Моделирование напряженно-деформированного состояния камеры судходного шлюза с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков, В. А. Данилюк // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 4. — С. 16а–21.
2. Моргунов К. П. Оценка технического состояния камеры шлюза по тепловому состоянию его элементов / К. П. Моргунов, А. А. Кардаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 22а–28.
3. СП 101.13330.2012 Подпорные стены, судходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. — М.: Минрегион России, 2012. — 70 с.
4. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости конструкций шлюзов № 5, 10 – 13, 15, грунтовой дамбы № 74, напорного трубопровода № 34 насосной станции № 32 Волго-Донского судходного канала с целью установления фактического технического состояния, запасов прочности и несущей способности сооружений и оборудования, разработка критериев безопасности: отчет о научно-исследовательской работе. — СПб.: ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций», 2008. — 131 с.
5. Технический отчет о строительстве Волго-Донского судходного канала им. В. И. Ленина: в 7 т. — М.: Госэнергоиздат, 1957 – 1958. — Т. 2. Организация строительства. Специальные гидротехнические работы. — 319 с.
6. Проведение георадарного обследования, определение состояния грунта в основании шлюза № 5 Волго-Донского судходного канала: отчет. — Уфа: ГУП «БашНИИстрой», 2008. — 48 с.
7. Колосов М. А. Использование георадарных методов исследования грунтов в основании камеры шлюза / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, Г. В. Коган // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 4. — С. 29–33.
8. Гольдин А. Л. Расчет осадок и кренов центральной секции шлюза № 5 Волго-Донского судходного канала / А. Л. Гольдин, М. А. Колосов, К. П. Моргунов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 3. — С. 15–21.

9. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходных шлюзов № 30, 31 Волгоградского гидроузла: отчет о научно-исследовательской работе. — СПб.: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 160 с.

10. Полевые исследования при проходке шурфа в засыпке камеры шлюза Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС: отчет. — М.: НИС «Гидропроект», 1981. — 156 с.

11. Восстановление контрольно-измерительной аппаратуры в стенке камеры шлюза и обеспечение возможности проведения дальнейших натурных наблюдений: отчет о науч.-исследов. работе. — М.: НИС «Гидропроект», 1982. — 87 с.

## RESEARCH OF CHANGE OF DESCRIPTIONS OF SOIL IN FOUNDATION AND BACKFILL OF SHIPPING LOCK IN THE PROCESS OF BUILDING AND EXPLOITATION OF HIDRAULIC CONSTRUCTION

*The considered of problem of adequate choice of basic data is considered at formulation of mathematical model of calculation of stress-strain state of constructions of shipping lock. By such calculations as input basic data accept descriptions of surrounding soil. Information about the characteristics soil can usually be obtained from materials of construction project. Existing in Russia navigable hydraulic engineering facilities were designed and built many years ago. By the example, determining the characteristics of the soils in the filling chamber locks on two hydroschemes FBU "Volga-Don", made over the years of operation, studied, both during construction and operation of changing the characteristics of the soil those around building. It was determined that soil properties have a material effect on both the process of organizing the construction work on the formation of an array of filling and subsequent modes of exploitation of construction.*

*Keywords: navigable sluice, intense-deformed condition of the constructions, properties of soils, soil decompaction.*

### REFERENCES

1. Goloskokov, D. P., and V. A. Daniljuk. "Modelling of the intense-deformed condition of the navigable sluice chamber by means of polynoms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4 (2011): 16a–21.

2. Morgunov, K. P., and A. A. Kardakov. "The assessment of the technical condition of the sluice by thermo condition of its elements." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 22a–28.

3. Russian Federation. Set of rules SP 101.13330.2012. Retaining walls, navigation locks, fish passing and fish protection facilities. М.: Minregion Rossii, 2012.

4. Provedenie issledovatel'skih rabot, poverochno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustojchivosti konstrukcij shljuzov №№ 5, 10, 11, 12, 13, 15, gruntovoj damby № 74, napornogo truboprovoda № 34 nasosnoj stancii № 32 Volgo-Donskogo sudohodnogo kanala s cel'ju ustanovlenija fakticheskogo tehničeskogo sostojanija, zapa-sov prochnosti i nesushhej sposobnosti sooruzhenij i oborudovanija, razrabotka krite-riev bezopasnosti: otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. SPb.: FGOU VPO «Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet vodnyh kommunikacij», 2008.

5. Volgo-Don. In: *Tehničeskij otchet o stroitelstve Volgo-Donskogo sudo-hodnogo kanala im. V. I. Lenina*. М.: Gosjenergoizdat, 1957. Vol. 2.

6. Provedenie georadarnogo obsledovanija, opredelenie sostojanija grunta v osnovanii shljuzu № 5 Volgo-Donskogo sudohodnogo kanala: otchet. Ufa: GUP «Bash-NIIstroj», 2008.

7. Kolosov, M. A., K. P. Morgunov, and G. V. Kogan. "Application of georadar (GPR) methods for researching the soil of hydraulic lock's foundation." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2009): 29–33.

8. Goldin, A. L., M. A. Kolosov, and K. P. Morgunov. "Calculation for settlement and slant of central part of hydraulic lock № 5 of Volga-Don inland navigation channel." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3 (2009): 15–21.

9. Provedenie issledovatel'skih rabot, poverochno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustojchivosti zhelezobetonnyh konstrukcij sudohodnyh shljuzov №№ 30, 31 Volgogradskogo gidrouzla: otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. SPb.: FGBOU VO «Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova», 2015.

10. Polevye issledovaniya pri prohodke shurfa v zasypke kamery shljuza Volzhskoj GJeS im. XXII sezda KPSS: otchet. M.: NIS «Gidroproekt», 1981.

11. Vosstanovlenie kontrolno-izmeritelnoj apparatury v stenke kamery shljuza i obespechenie vozmozhnosti provedeniya dalnejshih naturnyh nabljudenij: otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. M.: NIS «Gidroproekt», 1982.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Моргунов Константин Петрович* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*morgunovkp@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Morgunov Konstantin Petrovich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*morgunovkp@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 13 апреля 2016 г.*

**УДК 528.1**

**П. В. Томсон**

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ ГРУБЫХ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

*В данной статье рассматривается возможность выявления и вычисления грубых ошибок измерений в процессе первичной обработки. Грубые ошибки (большие случайные ошибки) могут быть вызваны различными причинами, возникающими при производстве различных измерений, в том числе при измерительных процессах, реализуемых в судовых условиях (определение места судна, измерение глубин и др.), и при геодезическом обеспечении исследовательских работ на море. Предлагаемый в данной работе алгоритм направлен на вычисление грубых ошибок измерений с последующим исправлением измеренных величин поправками, компенсирующими эти грубые ошибки. Предлагаемый алгоритм вычисления грубых ошибок измерения является альтернативой общепринятой методике отбраковки грубоошибочных измерений. Отмечается, что отбраковка грубоошибочных измерений ведёт к потере информативности измерений. Для достижения поставленной цели предлагается на первичном этапе обработки составлять условные уравнения поправок в исходном или линеаризованном виде и затем решать систему этих уравнений путём перебора относительно только тех поправок, которые предположительно соответствуют грубым ошибкам. Остальные поправки принимаются равными нулю. Число искомых грубых ошибок, естественно, не должно превышать числа условных уравнений. После исправления грубоошибочных измерений исключается необходимость их отбраковки.*

*Ключевые слова:* вычисление грубых ошибок измерений, случайные ошибки измерений, грубые ошибки измерений, условные уравнения, поправки к измеренным значениям, условные уравнения поправок, невязки, отбраковка грубоошибочных измерений.



При производстве различных видов измерений, в частности, в судовых условиях (определение места судна, измерение глубин и так далее), при выполнении геодезических работ (построение наземных сетей, спутниковое позиционирование, аэрофотосъёмка и др.) наряду со случайными ошибками, определяющими точность измерения, появляются большие случайные ошибки (грубые ошибки), выходящие за пределы точности данных измерений. Обработка измерений ведётся, в том числе, путём выявления и отбраковки грубоошибочных измерений, т. е. грубые ошибки удаляются из обработки результатов измерений вместе с самими измерениями их содержащими, а рядовые случайные ошибки допускаются до уравнивания, т. е. исправляются осреднёнными по тому или иному принципу уравнивания поправками.

Рядом авторов предложены различные способы выявления и отбраковки грубоошибочных измерений. Так, в работе [1] автор для линейных систем, подверженных импульсивным помехам, предлагает алгоритм минимизации онлайн суммы абсолютных ошибок путём использования устойчивого идентификатора. В работе [2] предлагается для выявления грубоошибочного измерения задавать вес измерения, обратный постоянному проценту от измеренной величины. Далее выполняется анализ на наличие грубой ошибки путём реализации процесса минимизации с использованием ошибки как функции оценки состояния. При обнаружении грубой ошибки предлагается исправлять измеренное значение. Авторы статьи [3] рассматривают вопросы борьбы с грубыми ошибками при мониторинге и контроле химических процессов путём применения динамического интервала выборки. В работе [4] для многомерных наборов данных авторами предлагается «*точный, экономичный и надёжный метод обнаружения грубых ошибок*», основанный на взвешенном анализе кластеризации.

Автор статьи [5] анализирует два метода обнаружения грубых ошибок геодезических измерений: по невязкам условных уравнений и поправкам в результаты измерений. На основе исследования первого метода автором сделан вывод о том, что *по невязкам условных уравнений определяются только крупные промахи*, поэтому предлагается находить грубые ошибки и отбраковывать грубоошибочные измерения по результатам уравнивания, сравнивая вычисленные поправки с допуском. После отбраковки одного грубоошибочного измерения уравнивание повторяется. В статьях [6], [7] предлагается для опознания грубоошибочных измерений заменять классические условные уравнения на *универсальное унифицированное условное уравнение*, в которое входят переносы трёх линий положения и дирекционные углы этих переносов. При реализации этого способа грубоошибочными измерениями считаются *те измерения, которые чаще (более) других участвовали в образовании недопустимых невязок*. В этом случае возникает вопрос: *кто решает, какие измерения участвуют чаще (более)?* В работах [8], [9] также рассматриваются вопросы борьбы с грубыми ошибками измерений, но уже в области аэрокосмической съёмки.

Предлагаемый алгоритм вычисления грубых ошибок измерения реализуется на первичной стадии обработки результатов измерения, т. е. до выполнения уравнительных вычислений. При подготовке к уравниванию, как известно, необходимо определить число избыточных измерений, которое, в свою очередь, определяет число условных уравнений. Допустим, что предполагается уравнивание коррелятным способом (ранее он назывался *методом условных уравнений*) метода наименьших квадратов (ранее и сейчас рядом авторов метод наименьших квадратов справедливо называется *способом наименьших квадратов* [10]).

Если измерено  $n$  равноточных величин, а число необходимых величин равно  $t$ , очевидно, что

$$n > t. \quad (1)$$

Тогда число избыточных измерений будет равно

$$r = n - t. \quad (2)$$

Каждое избыточное измерение вызывает одно условное уравнение.

Введем следующие обозначения:

$l_1 l_2 l_3 \dots l_n$  — измеренные значения;

$L_1 L_2 L_3 \dots L_n$  — уравненные значения;

$v_1 v_2 v_3 \dots v_n$  — поправки к измеренным значениям;

$L_1^0 L_2^0 L_3^0 \dots L_n^0$  — безошибочные (истинные) значения измеряемых величин.

Очевидно, что

$$L_1 = l_1 + v_1; \quad L_2 = l_2 + v_2; \quad L_3 = l_3 + v_3; \quad \dots \quad L_n = l_n + v_n. \quad (3)$$

Возникающие  $r$  условия можно записать в общем виде:

$$\begin{aligned} f_1(L_1^0 L_2^0 L_3^0 \dots L_n^0) &= 0; \\ f_2(L_1^0 L_2^0 L_3^0 \dots L_n^0) &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ f_r(L_1^0 L_2^0 L_3^0 \dots L_n^0) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для уравненных значений измеренных величин условные уравнения будут иметь вид условных уравнений измеряемых величин:

$$\begin{aligned} f_1(L_1 L_2 L_3 \dots L_n) &= 0; \\ f_2(L_1 L_2 L_3 \dots L_n) &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ f_r(L_1 L_2 L_3 \dots L_n) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив в условные уравнения измеряемых величин (5) вместо уравненных значений соответствующие измеренные значения, получим невязки условных уравнений:

$$\begin{aligned} f_1(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) &= w_1; \\ f_2(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) &= w_1; \\ &\dots\dots\dots \\ f_r(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) &= w_r. \end{aligned} \quad (6)$$

Если в левой части полученных выражений к измеренным значениям прибавить соответствующие поправки, которые компенсируют невязки, то получим условные уравнения поправок:

$$\begin{aligned} f_1(l_1 + v_1; l_2 + v_2; l_3 + v_3; \dots; l_n + v_n) &= 0; \\ f_2(l_1 + v_1; l_2 + v_2; l_3 + v_3; \dots; l_n + v_n) &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ f_r(l_1 + v_1; l_2 + v_2; l_3 + v_3; \dots; l_n + v_n) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные условные уравнения поправок уже позволяют вычислить грубые ошибки измерений. Отметим, что грубые ошибки можно вычислять также с линеаризованными условными уравнениями поправок, которые составляются для упрощения уравнительных вычислений.

Линеаризованные условные уравнения поправок получают путём разложения в ряд Тейлора условных уравнений поправок с ограничением их членами первого порядка:

$$\begin{aligned} f_1(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) + \frac{\partial f_1}{\partial l_1} v_1 + \frac{\partial f_1}{\partial l_2} v_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial l_n} v_n &= 0; \\ f_2(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) + \frac{\partial f_2}{\partial l_1} v_1 + \frac{\partial f_2}{\partial l_2} v_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial l_n} v_n &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ f_r(l_1 l_2 l_3 \dots l_n) + \frac{\partial f_r}{\partial l_1} v_1 + \frac{\partial f_r}{\partial l_2} v_2 + \dots + \frac{\partial f_r}{\partial l_n} v_n &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Если ввести обозначения:



усреднения, т. е. как бы из *усреднения случайных ошибок* (поправка — это ошибка с обратным знаком и наоборот). Попытки выявления грубых ошибок путём уравнивания приводят к усреднению поправок, в том числе поправок к грубоошибочным измерениям. В таких условиях выявление грубых ошибок становится проблематичным и чревато неправильным выбором измерения, подлежащего отбраковке, а о каком-либо исправлении измеренного значения речи вообще не идёт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bako L. Adaptive identification of linear systems subject to gross errors / L. Bako // Automatica. — 2016. — Vol. 67. — Pp. 192–199. DOI:10.1016/j.automatica.2016.01.023.
2. Bretas N. G. A two steps procedure in state estimation gross error detection, identification, and correction / N. G. Bretas, A. S. Bretas // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — 2015. — Vol. 73. — Pp. 484–490. DOI:10.1016/j.ijepes.2015.05.044.
3. Nicholson B. On-line state estimation of nonlinear dynamic systems with gross errors / B. Nicholson, R. López-Negrete, L. T. Biegler // Computers & Chemical Engineering. — 2014. — Vol. 70. — Pp. 149–159. DOI:10.1016/j.compchemeng.2013.11.018.
4. Xiao D. A gross error detection method based on 3MAD–GRW–MMMD / D. Xiao, J. Bao, B. Zhang // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. — 2015. — Vol. 146. — Pp. 24–33. DOI:10.1016/j.chemolab.2015.04.021.
5. Коузия В. А. Сравнение методов обнаружения и идентификации ошибок измерений / В. А. Коузия // Геодезия и картография. — 1998. — № 5. — С. 23–27.
6. Макаров Г. В. Оpozнание грубоошибочных измерений в геодезических сетях: от классических условных уравнений к уравнениям универсальным / Г. В. Макаров // Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». — СПб.: Политехника, 2015. — С. 110–114.
7. Макаров Г. В. Отбраковка грубых ошибок измерений. Возрождение условных уравнений / Г. В. Макаров // Изыскательский вестник. — 2011. — № 2 (12). — С. 10–14.
8. Райзман Ю. Г. Отбраковка грубых измерений при определении элементов внешнего ориентирования снимка / Ю. Г. Райзман // Геодезия и картография. — 1986. — № 10. — С. 29–33.
9. Хрущ Р. М. Отбраковка точек при определении элементов взаимного ориентирования снимков стереопары / Р. М. Хрущ, А. Н. Гринь, А. В. Соловьев // Информация и космос. — 2016. — № 1. — С. 80–84.
10. Платонов А. К. Методы обработки измерений: учеб. пособие для студентов вузов по направлению подготовки «Прикладные математика и физика» / А. К. Платонов, Д. С. Иванов. — М.: МФТИ, 2013. — 107 с.

## DESIGN OF ALGORITHM OF THE COMPUTATION OF GROSS ERRORS OF MEASUREMENTS

*This article discusses the possibility of identifying and calculating gross measurement errors during preprocessing. Blunders (large random error) may occur for various reasons in the production of different dimensions, including measuring the processes implemented in the marine environment (location of the vessel, measuring depths, etc.) and geodesic ensuring research operations at sea. The proposed algorithm in this work aims at calculating the gross errors of measurements with subsequent correction of measured values amended by these gross errors. The proposed algorithm to compute the gross errors of measurement is an alternative to using a generally accepted method of rejection the grossly erroneous measurements. According to the author of this article, the grossly erroneous rejection of measurements leads to loss of informative measurements. To achieve the objectives proposed at the primary processing stage be conditional equation of the amendments in the original or as a linearized and then solve these equations by busting concerning only those amendments that supposedly correspond to gross errors. The remaining amendments were adopted to zero. Number of desired gross errors of course should not exceed the number of conditional equations. After fixing the grossly erroneous measurement eliminates the need to their rejection.*

*Keywords: the computation of gross measurement errors, random errors of measurements, gross errors of measurements, conditional equations, amendments to the measured values, conditional equation of amendments, residuals, rejection the grossly erroneous measurements.*

## REFERENCES

1. Bako, Laurent. "Adaptive identification of linear systems subject to gross errors." *Automatica* 67 (2016): 192–199. DOI:10.1016/j.automatica.2016.01.023.
2. Bretas, Newton G., and Arturo S. Bretas. "A two steps procedure in state estimation gross error detection, identification, and correction." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73 (2015): 484–490. DOI:10.1016/j.ijepes.2015.05.044.
3. Nicholson, Bethany, Rodrigo López-Negrete, and Lorenz T. Biegler. "On-line state estimation of nonlinear dynamic systems with gross errors." *Computers & Chemical Engineering* 70 (2014): 149–159. DOI:10.1016/j.compchemeng.2013.11.018.
4. Xiao, Dong, Jingjing Bao, and Bi Zhang. "A gross error detection method based on 3MAD–GRW–MMMD." *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 146 (2015): 24–33. DOI:10.1016/j.chemolab.2015.04.021.
5. Kougija, V. A. "Sravnenie metodov obnaruzhenija i identifikacii oshibok izmerenij." *Geodesy and Cartography* 5 (1998): 23–27.
6. Makarov, G. V. "Opoznanie grubooshibochnyh izmerenij v geodezicheskikh setjah: ot klassicheskikh uslovnyh uravnenij k uravnenijam universalnym." *Sb. materialov mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. «Geodezija, kartografija, geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedrenija»*. SPb.: Politehnika, 2015: 110–114.
7. Makarov, G. V. "Otbrakovka grubyh oshibok izmerenij. Vozrozhdenie uslovnyh uravnenij." *Izyskatelskij vestnik* 2(12) (2011): 10–14.
8. Rajzman, Ju. G. "Otbrakovka grubyh izmerenij pri opredelenii jelementov vneshnego orientirovaniya snimka." *Geodesy and Cartography* 10 (1986): 29–33.
9. Hrushh, R. M., A. N. Grin, and A. V. Solovev. "Otbrakovka toчек pri opredelenii jelementov vzaimnogo orientirovaniya snimkov stereopary." *Informacija i kosmos* 1 (2016): 80–84.
10. Platonov, A. K., and D. S. Ivanov. *Metody obrabotki izmerenij: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov po naprav-leniju podgotovki «Prikladnye matematika i fizika»*. M.: MFTI, 2013.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Томсон Петр Васильевич —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
peter-thomson@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Thomson Peter Vasil'evich —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
peter-thomson@mail.ru, kaf\_geo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2016 г.

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 539.04

А. В. Павлов,  
В. Б. Чистов

### РАССТАНОВКА СТАПЕЛЬНЫХ ТУМБ ПРИ РЕМОНТЕ КОРПУСА СУДНА

*При ремонте корпуса судна на стапеле могут возникнуть остаточные напряжения и деформации, которые негативно влияют на обеспечение общей прочности и изменения формы. Величина остаточных напряжений и деформаций зависит в основном от величины изгибающего момента в зоне ремонта, который определяется распределением весовой нагрузки и силой поддержания стапельных тумб. В статье предложен вывод зависимостей для расчета необходимого количества стапельных тумб и места их установки во время ремонта корпуса судна на стапеле, обеспечивающий минимальный изгибающий момент по всей длине корпуса судна с учетом конечной жесткости, что создаст благоприятные условия для разработки технических процессов ремонта, обеспечивающих расширение фронта работ и минимальные остаточные напряжения и деформации в корпусе.*

*Ключевые слова:* стапельные тумбы, изгибающий момент, силы поддержания, эквивалентный брус, теоретическая шпация.

#### Введение

Во время ремонта судна могут появиться остаточные напряжения и деформации на определенных участках корпуса, влияющие на обеспечение его общей прочности и изменения формы [1] – [3]. Величины возможных остаточных напряжений при различных видах ремонта представлены в [4]. Остаточные напряжения и деформации зависят в основном от величины изгибающего момента, который определяется распределением весовой нагрузки и силой поддержания стапельных тумб. При ремонте на стапеле величину изгибающего момента можно регулировать, правильно расставив стапельные тумбы. В этом случае теоретически можно добиться такого состояния, что на всей длине судна изгибающий момент будет минимальным. В технологической и учебной литературе даются рекомендации по расстановке стапельных тумб, исходя из условия обеспечения местной прочности [5]. Профессором С. О. Барышниковым [6], [7] был предложен способ расчета расстановки стапельных тумб, обеспечивающий заданный изгибающий момент в заданном сечении корпуса.

В настоящей работе предлагается вывод зависимостей для расчета количества и места установки стапельных тумб, обеспечивающих минимальный изгибающий момент по всей длине корпуса судна.

#### Основная часть

Для решения задачи принимаются следующие допущения.

1. Корпус судна представляется в виде эквивалентного бруса конечной жесткости в районе цилиндрической вставки на нескольких шарнирно-подвижных непроседающих опорах, установленных на расстоянии 10 – 12 м (кратном рамной шпации), и абсолютно жесткого бруса в оконечностях, опирающегося на проседающие опоры, устанавливаемые через 4 – 6 м (расстояние, кратное рамной шпации). Схема эквивалентного бруса представлена на рис. 1, где  $l_i^k, l_i^h$  — расстояние между проседающими опорами в кормовой и носовой оконечностях соответственно;  $l_i^c$  — расстояние между непроседающими опорами в районе цилиндрической вставки;  $L_k$  — длина от кормового перпендикуляра до ближайшего практического рамного шпангоута, под которым установлена непроседающая опора;  $L_n$  — длина от носового перпендикуляра до ближайшего практического рамного шпангоута, под которым установлена непроседающая опора;  $L_c$  — длина средней части корпуса судна.

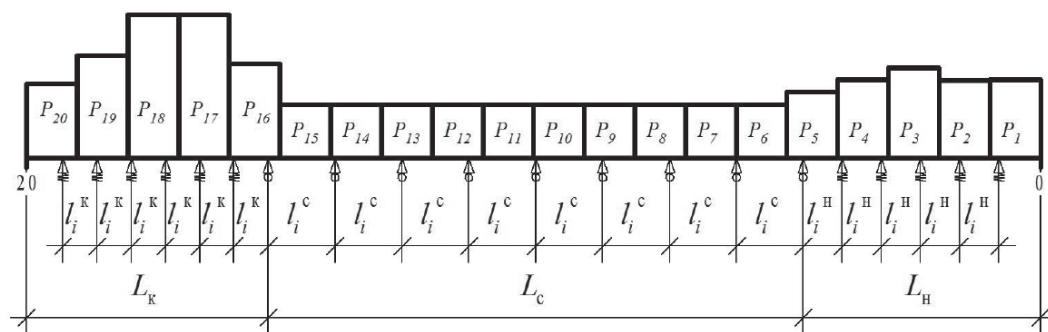


Рис. 1. Расстановка опор по длине корпуса судна

2. Опора образуется несколькими стапельными тумбами с деревянными клиньями, регулирующими их высоту, установленными в одном сечении под рамным флором.

3. Перемещения, вызванными поперечной силой на участке с конечной жесткостью, пренебрегаем.

Расстановка стапельных тумб на границах участков показана на рис. 2. Длина каждого из участков определяется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} L_k &= 5A - b_k; \\ L_n &= 4A - b_n; \\ L_c &= L - L_k - L_n, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $A$  — теоретическая шпация;  $b_k$  — расстояние от крайнего теоретического шпангоута в кормовой оконечности до ближайшего практического рамного шпангоута, под которым установлена непроседающая опора, рис. 2, а;  $b_n$  — расстояние от крайнего теоретического шпангоута в носовой оконечности до ближайшего практического рамного шпангоута, под которым установлена непроседающая опора, рис. 2, б.

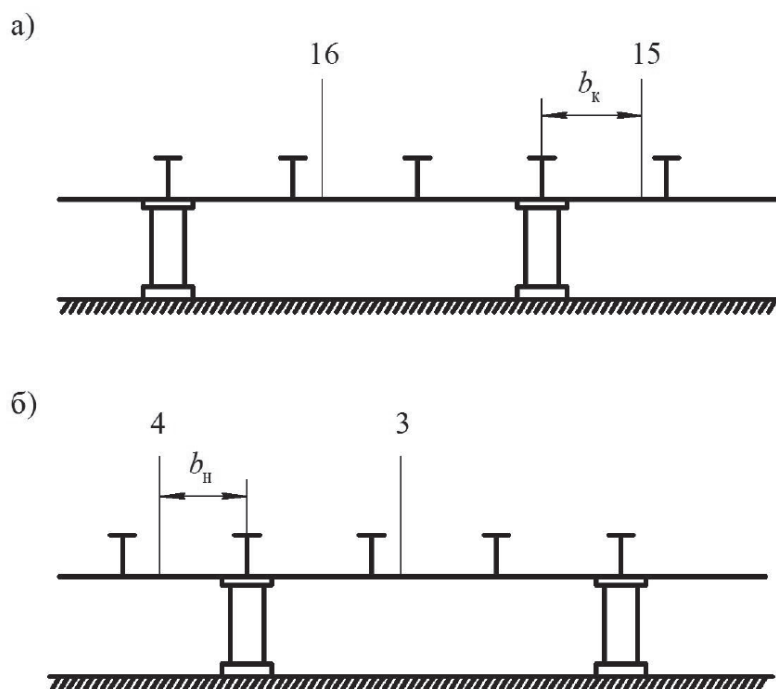


Рис. 2. Расстановка опор на границах участка:  
а — средняя часть — корма; б — средняя часть — нос

Количество стапельных тумб и места их установки определим, рассматривая нагрузку и возможные перемещения каждой из частей эквивалентного бруса. Схема нагрузки и перемещений эквивалентного бруса в кормовой оконечности показана на рис. 3.

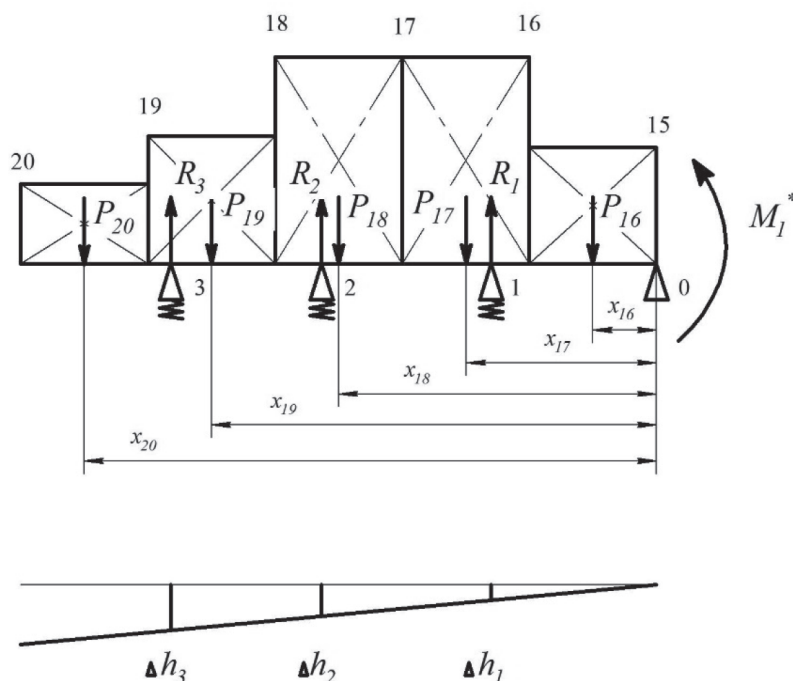


Рис. 3. Схема нагрузки и перемещений эквивалентного бруса в кормовой оконечности

Из условий равновесия статики можно записать два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \sum p_i x_i - \sum_1^n R_i^k l_i^k + M_1^* &= 0; \\ \sum R_i^k - \sum p_i &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $p_i$  — вес  $i$ -й теоретической шпации;  $x_i$  — расстояние от нулевой опоры до центра тяжести  $i$ -й теоретической шпации;  $R_i^k$  — реакция  $i$ -й опоры;  $M_1^*$  — изгибающий момент, передаваемый от кормовой оконечности на среднюю часть.

Из условия совместности деформаций [8], перемещения в результате проседания опор и перемещения сечений бруса в районе опор, получим дополнительное уравнение, связывающее реакции между собой:

$$\Delta h_i = \frac{R_i^k h_i}{E_d m_i F_k}, \quad (3)$$

где  $\Delta h_i$  — проседание  $i$ -й опоры;  $h_i$  — высота пары клиньев;  $m_i$  — количество пар клиньев в одном сечении;  $F_k$  — горизонтальная площадь контакта пары клиньев;  $E_d = 2 \cdot 10^2$  МПа — модуль нормальной упругости для дерева поперек волокон.

Условие совместности деформаций имеет вид

$$\frac{\Delta h_i}{\Delta h_1} = \frac{\sum_1^n l_i}{l_1}, \quad (4)$$

где  $l_i$  — расстояние между  $i$ -ми опорами.

После подстановки значений проседания опор в условие совместности деформаций получим следующее соотношение между реакциями:

$$R_i^k = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l_1} \cdot \frac{m_i}{m_1} R_1^k. \quad (5)$$

Таким образом, все реакции опор могут быть выражены через одну реакцию  $R_1^k$ .

Момент, передаваемый от кормовой оконечности на среднюю часть, определяется после рассмотрения угла поворота на нулевой опоре. Для балки, шарнирно опертой на две опоры и нагруженной изгибающим моментом на нулевой опоре, угол поворота будет следующим:

$$\Theta_0 = \frac{M_1^* l_1}{3EJ}, \quad (6)$$

где  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа — модуль нормальной упругости стали;  $J$  — момент инерции поперечного сечения в районе нулевой опоры относительно нейтральной оси.

Так как эквивалентный брус в кормовой оконечности принят абсолютно жестким, то угол поворота будет следующим:

$$\Theta_0 = \frac{\Delta h_1}{l_1^k} = \frac{R_1^k h_1}{E_d m_1 F_k l_1}. \quad (7)$$

Приравняв значения по двум последним формулам, после преобразования получим выражение для  $M_1^*$ :

$$M_1^* = \frac{3EJR_1^k h_1 l_1^k}{E_d m_1 F_k (l_1^k)^3} = K^k R_1^k l_1^k, \quad (8)$$

где  $K^k = \frac{3EJh_1}{E_d m_1 F_k (l_1^k)^3}$  — коэффициент.

Координаты нагрузок на теоретическую шпацию (отстояние от нулевой опоры):

$$\left. \begin{aligned} x_{16} &= 0,5A - b_k; \\ x_{17} &= 1,5A - b_k; \\ x_{18} &= 2,5A - b_k; \\ x_{19} &= 3,5A - b_k; \\ x_{20} &= 4,5A - b_k. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя значение реакций из соотношения (5) в первое уравнение равновесия статики, получим

$$\sum p_i x_i - R_1^k l_1^k - \frac{l_1^k + l_2^k}{l_1^k} \cdot \frac{m_2}{m_1} R_1^k (l_1^k + l_2^k) - \frac{l_1^k + l_2^k + l_3^k}{l_1^k} \cdot \frac{m_3}{m_1} R_1^k (l_1^k + l_2^k + l_3^k) - K^k R_1^k l_1^k = 0. \quad (10)$$

Решая уравнение относительно реакции первой опоры  $R_1^k$ , получим

$$R_1^k = \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k \left( 1 + \frac{(l_1^k + l_2^k)^2}{(l_1^k)^2} \frac{m_2}{m_1} + \frac{(l_1^k + l_2^k + l_3^k)^2}{(l_1^k)^2} \frac{m_3}{m_1} + K^k \right)}. \quad (11)$$

Если расстояния между опорами одинаковы и количество пар клиньев на каждой опоре постоянно, кроме нулевой, то получим значение реакций опор по формулам:

$$R_1^k = \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (1 + 4 + 9 + K^k)} = \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)}; \quad (12)$$

$$R_2^k = 2 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)}; \quad (13)$$

$$R_3^k = 3 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)}. \quad (14)$$

Значение реакции  $R_0^k$  получим из второго уравнения равновесия статики. Если расстояния между опорами одинаковы и количество пар клиньев на каждой опоре постоянно, то

$$R_0^k = \sum p_i - \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)} - 2 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)} - 3 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)}. \quad (15)$$

Преобразовав выражение (15), получим

$$R_0^k = \sum p_i - \frac{6 \sum p_i x_i}{l_1^k (14 + K^k)}. \quad (16)$$

Схема нагрузки и перемещений в носовой оконечности показана на рис. 4.

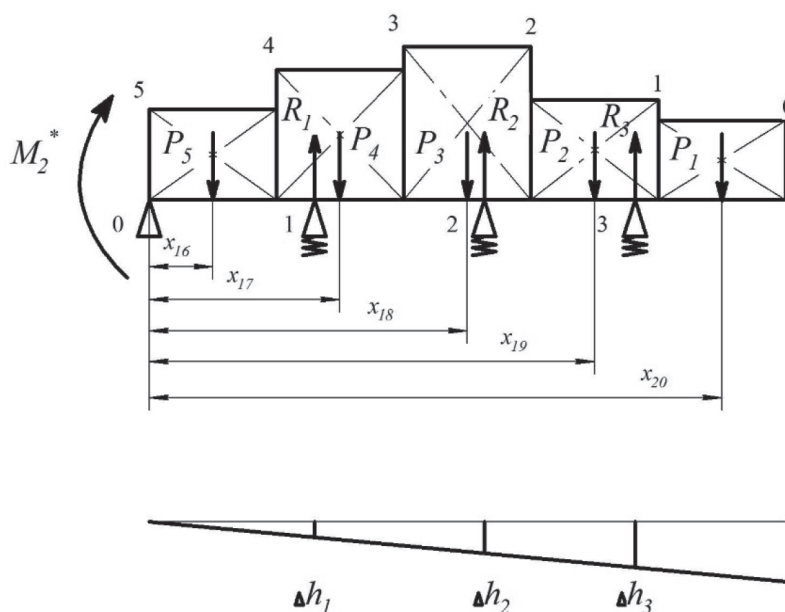


Рис. 4. Схема нагрузки и перемещений эквивалентного бруса в носовой оконечности

Условия равновесия статики для носовой оконечности будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum p_i x_i - \sum_1^n R_i^h l_i^h + M_2^* &= 0; \\ \sum R_i^h - \sum p_i &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $R_i^h$  — реакция  $i$ -й опоры;  $M_2^*$  — изгибающий момент, передаваемый от носовой оконечности на среднюю часть.

Повторив рассуждения для носовой оконечности, как для кормовой, получим

$$M_2^* = \frac{3EJh_1^h l_1^h}{E_d m_1 F_h (l_1^h)^3} = K^h R_1^h l_1^h, \quad (18)$$

где  $K^h = \frac{3EJh_1^h}{E_d m_1 F_h (l_1^h)^3}$  — коэффициент.

Координаты нагрузок на теоретическую шпацию (расстояние от нулевой опоры), как представлено на рис. 4:

$$\left. \begin{aligned} x_5 &= 0,5A - b_n; \\ x_4 &= 1,5A - b_n; \\ x_3 &= 2,5A - b_n; \\ x_2 &= 3,5A - b_n; \\ x_1 &= 4,5A - b_n. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Реакция на первую опору в носовой части

$$R_1^n = \frac{\sum p_i x_i}{l_1^n \left( 1 + \frac{(l_1^n + l_2^n)^2}{(l_1^n)^2} \frac{m_2}{m_1} + \frac{(l_1^n + l_2^n + l_3^n)^2}{(l_1^n)^2} \frac{m_3}{m_1} + K^n \right)}. \quad (20)$$

Если расстояния между опорами одинаковы и количество пар клиньев на каждой опоре постоянно, кроме нулевой, то получим значения реакций опор по формулам:

$$R_1^n = \frac{\sum p_i x_i}{l_1^n (14 + K^n)}; \quad (21)$$

$$R_2^n = 2 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^n (14 + K^n)}; \quad (22)$$

$$R_3^n = 3 \frac{\sum p_i x_i}{l_1^n (14 + K^n)}. \quad (23)$$

При упомянутых условиях реакция  $R_0^n$ :

$$R_0^n = \sum p_i - \frac{6 \sum p_i x_i}{l_1^n (14 + K^n)}. \quad (24)$$

Реакции опор в средней части корпуса судна находятся в результате раскрытия статической неопределимости многопролетной балки с помощью уравнения трех моментов. Схема средней части эквивалентного бруса, расстановка опор и расчетные величины для раскрытия статической неопределимости балки показаны на рис. 5.

Уравнение трех моментов [9] имеет вид

$$M_{i-1} l_i + 2 M_i (l_i + l_{i+1}) + M_{i+1} l_{i+1} = -6 \left( \omega_i \frac{a_i}{l_i} + \omega_{i+1} \frac{b_i}{l_{i+1}} \right), \quad (25)$$

где  $M_i$  — момент на опорах;  $l_i = l$  — расстояние между опорами;  $\omega_i = \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \frac{2}{3} \frac{q l^2}{8} l = \frac{q l^2}{12}$  — площади эпюр изгибающих моментов от нагрузки на каждый пролет;  $\frac{a_i}{l_i} = \frac{b_i}{l_i} = \frac{1}{2}$  — отношение расстояний от опоры до центра тяжести площади эпюры изгибающего

момента к длине пролета;  $q = \frac{6}{10A} \sum_{i=1}^{15} p_i$  — равномерно распределенная нагрузка на балку.

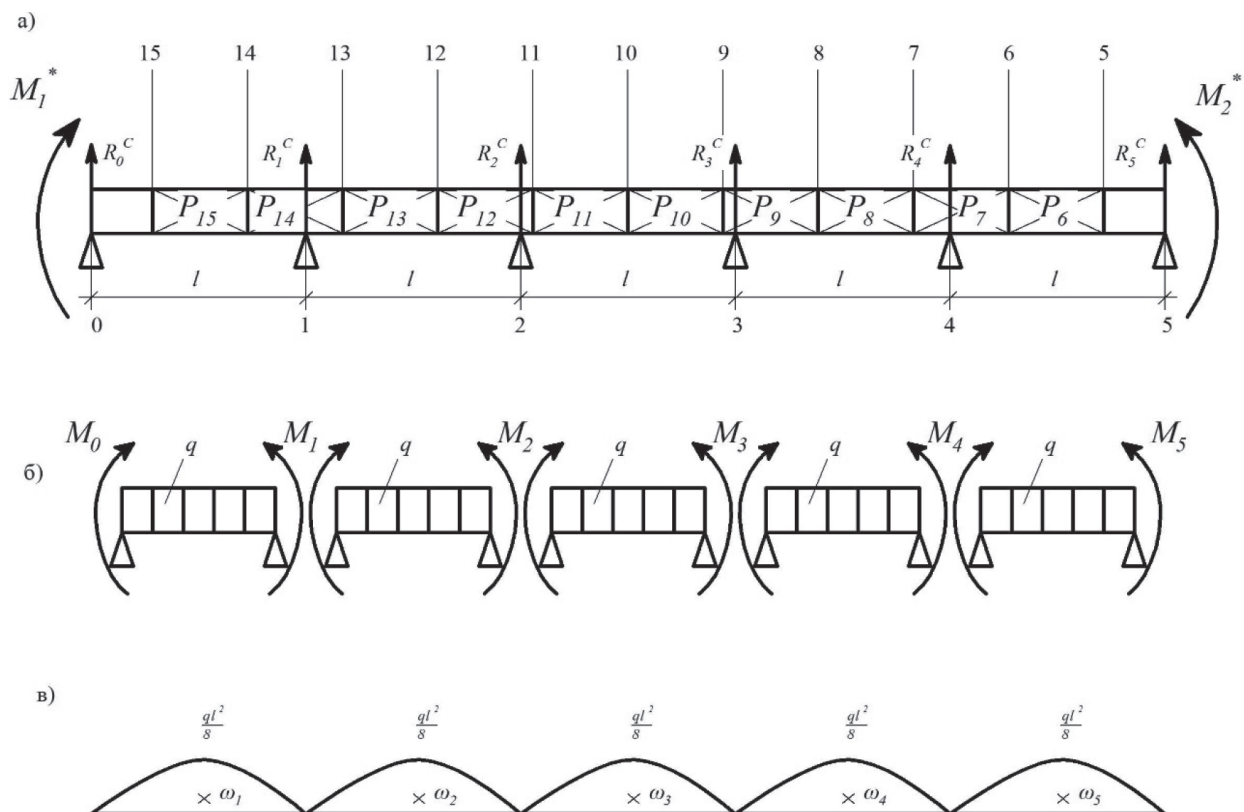


Рис. 5. Определение реакций опор в средней части:

а — схема эквивалентного бруса в средней части; б — нагрузки на пролеты и опорные моменты; в — эпюры изгибающих моментов от нагрузки на пролеты

После подстановки значений в уравнение трех моментов получим четыре уравнения, связывающих моменты на опорах между собой и нагрузкой на каждый из пролетов:

$$M_1^c = -\frac{22}{209}ql^2 - \frac{56}{209}M_1^* + \frac{1}{209}M_2^*; \quad (26)$$

$$M_2^c = -\frac{33}{418}ql^2 + \frac{15}{209}M_1^* - \frac{4}{209}M_2^*; \quad (27)$$

$$M_3^c = -\frac{33}{418}ql^2 - \frac{4}{209}M_1^* + \frac{15}{209}M_2^*; \quad (28)$$

$$M_4^c = -\frac{22}{209}ql^2 + \frac{1}{209}M_1^* - \frac{56}{209}M_2^*. \quad (29)$$

Используя значения опорных моментов, находим значения реакций опор в средней части:

$$R_0^c = \frac{165}{418}ql - \frac{265}{209}\frac{M_1^*}{l} + \frac{1}{209}\frac{M_2^*}{l}; \quad (30)$$

$$R_1^c = \frac{473}{418}ql + \frac{336}{209}\frac{M_1^*}{l} - \frac{6}{209}\frac{M_2^*}{l}; \quad (31)$$

$$R_2^c = \frac{407}{418}ql - \frac{90}{209}\frac{M_1^*}{l} + \frac{24}{209}\frac{M_2^*}{l}; \quad (32)$$

$$R_3^c = \frac{407}{418}ql + \frac{24}{209} \frac{M_1^*}{l} - \frac{90}{209} \frac{M_2^*}{l}; \quad (33)$$

$$R_4^c = \frac{473}{418}ql - \frac{6}{209} \frac{M_1^*}{l} + \frac{336}{209} \frac{M_2^*}{l}; \quad (34)$$

$$R_5^c = \frac{165}{418}ql + \frac{1}{209} \frac{M_1^*}{l} - \frac{265}{209} \frac{M_2^*}{l}. \quad (35)$$

Каждая из реакций — это равнодействующая равновеликих реакций от стапельных тумб, поэтому количество стапельных тумб в зоне каждой из реакций будет:

$$n_i^k = \frac{R_i^k}{p_T}; \quad (36)$$

$$n_i^c = \frac{R_i^c}{p_T}; \quad (37)$$

$$n_i^H = \frac{R_i^H}{p_T}, \quad (38)$$

где  $p_T$  — реакция от одной стапельной тумбы.

Общее количество стапельных тумб под судном будет равно

$$n = \frac{G}{p_T} = \sum n_i^k + \sum n_i^c + \sum n_i^H. \quad (39)$$

Если стапельные тумбы в сечении расположены у середины теоретической шпации, в пределах половины ее длины, то реакции этих тумб вычисляются полностью из весовой нагрузки этой теоретической шпации. Если тумбы сечения расположены на расстоянии менее  $0,4 A$  от ее границы, то нагрузка от реакции этих стапельных тумб делится на две части, действующие на данную и соседнюю теоретическую шпацию, в зависимости от расстояния до середин этих двух соседних шпаций, как показано на рис. 6.

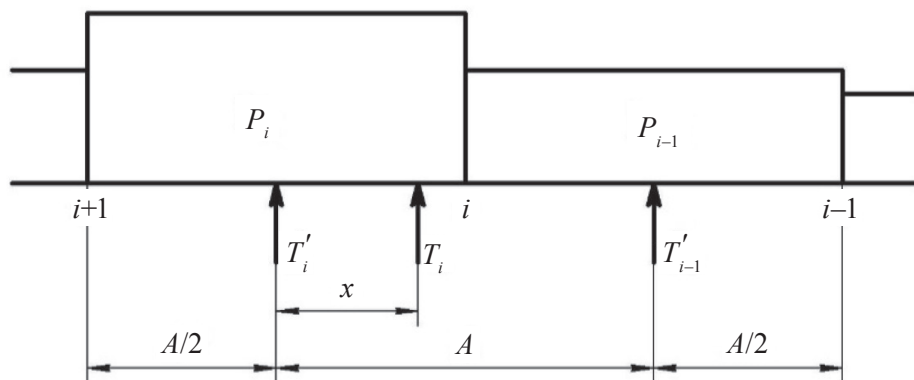


Рис. 6. Распределение сил поддержания в соседних теоретических

Как видно из рис. 6, силы поддержания каждой из соседних шпаций от тумб в этом сечении будут следующими:

$$T_i = n_c p_T; \quad (40)$$

$$T'_i = T_i \frac{x}{A}; \quad (41)$$

$$T'_{i-1} = T_i \left(1 - \frac{x}{A}\right). \quad (42)$$

С учетом сил поддержания нагрузка на каждую теоретическую шпацию будет следующей:

$$p'_i = p_i - T_i - T'_i - T'_{i-1}, \quad (43)$$

где  $T_i$  — сила поддержания теоретической шпации от ряда стапельных тумб, расположенного у ее середины в пределах  $\pm 0,2A$  (зависимость 40);  $T'_i$  — сила поддержания теоретической шпации от ряда стапельных тумб, расположенного в пределах этой шпации, за пределами  $\pm 0,2A$  от середины (зависимость 41);  $T'_{i-1}$  — сила поддержания теоретической шпации от ряда стапельных тумб, расположенного в соседней теоретической шпации на границе с рассматриваемой (зависимость 42)).

Откорректированные значения нагрузки на каждую теоретическую шпацию позволяют рассчитать значения изгибающих моментов и поперечной силы, возникающие в корпусе судна на стапеле по стандартной методике [10].

### Выводы

При ремонте корпуса судна стапельные тумбы расставляют исходя из соображений обеспечения местной прочности. Такой способ расстановки не учитывает возникающие во время ремонта, остаточные напряжения и деформации. Остаточные напряжения и деформации зависят в основном от величины изгибающего момента, который определяется распределением весовой нагрузки и силой поддержания стапельных тумб. Поэтому авторами данной статьи изложены теоретические основы расстановки стапельных тумб при ремонте.

Корпус судна представляется в виде эквивалентного бруса конечной жесткости в районе цилиндрической вставки на нескольких шарнирно-подвижных непроседающих опорах, установленных на расстоянии 10 – 12 м (кратном рамной шпации), и абсолютно жесткого бруса в оконечностях, опирающегося на проседающие опоры, устанавливаемые через 4 – 6 м (расстояние, кратное рамной шпации).

В кормовой и носовой оконечностях из условия равновесия статики и условия совместности деформаций определяются реакции от стапельных тумб. В средней части корпуса судна, в результате раскрытия статической неопределимости многопролетной балки с помощью уравнения трех моментов, определяются реакции от стапельных тумб.

Предложенные теоретические основы расстановки стапельных тумб позволяют обеспечить минимальное значение изгибающего момента в корпусе судна при ремонте на стапеле, что создает благоприятные условия для разработки технических процессов ремонта, обеспечивающих расширение фронта работ и минимальные остаточные напряжения и деформации в корпусе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карлина // Вестник ИНЖЭКОНа. — Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128.
2. Барышников С. О. Устранение остаточного перегиба корпусов судов / С. О. Барышников. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2011. — 200 с.
3. Павлов А. В. Влияние остаточных напряжений на редуцированные коэффициенты ребер жесткости / А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 60–64.
4. Павлов А. В. Остаточные напряжения в корпусе судна теплохода «Невский» при ремонте / А. В. Павлов // Материалы VI межвузовской науч. практич. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 14 мая 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — С. 151–155.

5. Курников А. С. Технология ремонта корпусов судов / А. С. Курников. — Нижний Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2008. — 237 с.

6. Барышников С. О. Определение остаточного общего прогиба (перегиба) корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Морской вестник. — 2011. — № 1. — С. 109–111.

7. Барышников С. О. Правка корпуса судна частичными поперечными разрезами / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 4. — С. 69а–81.

8. Александров А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. — М.: Высш. шк., 2003. — 560 с.

9. Папкович П. Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4 т. / П. Ф. Папкович. — Л.: Государственное союзное изд-во судостроительной промышленности, 1962. — Т. 1. — 576 с.

10. Давыдов В. В. Справочник по прочности судов внутреннего плавания / В. В. Давыдов, Н. В. Матесс, И. Н. Сиверцев. — М.: Речной транспорт, 1958. — 758 с.

## ARRANGEMENT OF SHIPBUILDING BOLLARDS DURING SHIP HULL REPAIR

*Residual stresses and deformations which negatively affect general strength and shape change can arise during ship hull repair on a shipbuilding way. Intensity of residual stresses and deformations depends mainly upon bending moment value in repair area which is defined by distribution of weight load and working buoyancy of shipbuilding bollards. For this reason in this article we offer readout of dependencies for calculation of required quantity of shipbuilding bollards and places of their installation during ship hull repair which ensures minimal bending moment along the full length of ship hull taking into account finite stiffness, what will create favorable conditions for development of the technical processes of repair providing expansion of a scope of work both the minimum residual stresses and deformations in the hull.*

*Keywords: shipbuilding bollards, bending moment, working buoyancy, main hull girder, station spacing.*

## REFERENCES

1. Baryshnikov, Sergey Olegovich, and Tatiana Osipovna Karklina. "Total residual strain ship hulls." *Vestnik INZhJekONa. Serija: Tehnicheskie nauki* 8 (2010): 124–128.

2. Baryshnikov, S. O. *Ustranenie ostatochnogo peregiba korpusov sudov*. SPb.: SPGUVK, 2011.

3. Pavlov, A. V., and V. B. Chistov. "Influence of residual stress on reduction factors of reinforcement ribs." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 60–64.

4. Pavlov, A. V. "Ostatochnye naprjazhenija v korpuse sudna teplohoda "Nevskij" pri remonte." *Materialy VI mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii aspirantov, studentov i kursantov "Sovremennye tendencii i perspektivy razvitija vodnogo transporta Rossii" 14 maja 2015*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2015: 151–155.

5. Kurnikov, A. S. *Tehnologija remonta korpusov sudov*. Nizhnij Novgorod: VГАVТ, 2008.

6. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina, and V. B. Chistov. "Opredelenie ostatochnogo obshhego progiba (peregiba) korpusa sudna." *Morskoy vestnik* 1 (2011): 109–111.

7. Baryshnikov, S. O., and T. O. Karklina. "Ship hull straightening by partial cross cutting." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4 (2011): 69а–81.

8. Aleksandrov, A. V., V. D. Potapov, and B. P. Derzhavin. *Soprotivlenie materialov*. M.: Vysshaja shk., 2003.

9. Papkovich, P. F. *Trudy po stroitel'noj mehanike korablja*. Vol. 1. L.: Gosudarstvennoe sojuznoe izdatelstvo sudostroitelnoj promyshlennosti, 1962.

10. Davydov, V. V., N. V. Matess, and I. N. Sivercev. *Spravochnik po prochnosti sudov vnutrennego plavaniya*. M.: Rechnoj transport, 1958.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Анатолий Владимирович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Чистов Валентин Борисович.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*denver\_toropec@mail.ru*  
Чистов Валентин Борисович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_soprpmat@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavlov Anatoli Vladimirovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Chistov Valentin Borisovich.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*denver\_toropec@mail.ru*  
Chistov Valentin Borisovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_soprpmat@gumrf.ru*

*Статья поступила в редакцию 5 апреля 2016 года*

**УДК 629.5.015.4:539.431**

**А. И. Коростылёв,  
Д. Ю. Литвиненко**

### **АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДНА**

*Рассмотрены существующие методы расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна: номинального напряжения, сравнительного анализа, экспериментально-теоретический, деформационные и энергетические, базирующиеся на использовании конструктивных напряжений, эффективных коэффициентов концентрации напряжений, понятий механики разрушения. Также рассмотрена методика, представленная в Российском морском регистре судоходства. Выполнен анализ вышеперечисленных способов расчета циклической прочности, выявлены и отмечены их достоинства и недостатки, а также проанализирована пригодность к решению практических задач усталостной прочности конструктивных узлов корпуса судна. Предложена классификация указанных способов по типу показателя интенсивности накопления усталостного повреждения. Произведено сравнение результатов расчета усталостных повреждений различных судокорпусных конструкций методами номинального напряжения, деформационным и использующим эффективный коэффициент концентрации напряжений. Определены возможные пути усовершенствования экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности узлов корпуса судна.*

*Ключевые слова: сварной узел, усталостная прочность, методы расчета, коэффициент концентрации напряжений, усталостная трещина, конструктивные напряжения, номинальные напряжения.*

#### **Введение**

Корпус судна на протяжении срока эксплуатации подвергается значительному числу циклов переменного нагружения различного происхождения, которые при определенной интенсивности могут привести к появлению трещины усталости, разрушению конструктивного узла, появлению течи и даже гибели судна. Учитывая данное обстоятельство, обеспечение циклической прочности корпуса судна является одной из важнейших задач строительной механики корабля.

В современных условиях кроме классического «проектирования из условия обеспечения предельной прочности» становится особенно актуальным «проектирование из условия обеспечения усталостной прочности». Повышение важности обеспечения усталостной прочности судокорпусных конструкций в последнее время обусловлено рядом факторов. Для оценки величины

накопленного усталостного повреждения в узлах корпуса судна, решения задач их проектирования из условия обеспечения усталостной прочности или определения предельно допустимых параметров нагружения из того же условия необходимо обладать надежными расчетными методами, позволяющими решать на практике все указанные задачи.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

К основным обобщающим исследованиям, опубликованным на территории СНГ, где были собраны и проанализированы методы решения проблемы усталости судокорпусных конструкций, относится работа [1], в которой отражена разработанность проблемы по состоянию на 80-е гг. XX в. Серьезным шагом к решению данной проблемы явилось распространение и совершенствование программного обеспечения для расчета конструкций численными методами, которое имело место в последние два десятилетия. В работах [2] — [6] представлены анализ и сравнение основных современных методов расчета циклической прочности применительно к сварным металлоконструкциям в целом.

Краткое описание и анализ основных способов оценки усталостной прочности, применяющихся к расчету судокорпусных конструкций исходя из концепций «Эксплуатация без повреждений» («Safe-life») и «Безопасная эксплуатация» («Fail safe») представлены в работе [7]. В данном исследовании, однако, отсутствует описание и анализ деформационного метода, который также имеет широкое приложение [1], [6]. Следует отметить, что в указанных работах классификация описанных методов расчета циклической прочности не проводилась. Исключением является работа [1], однако приведенная в ней классификация отображает разработанность проблемы по состоянию на 80-е гг. XX в.

### **Цель работы**

*Цель работы* — выполнить анализ и классифицировать основные методы расчета усталостной прочности сварных тонкостенных конструкций корпуса судна, оценить достоинства и недостатки, определить их пригодность для решения практических задач усталостной прочности.

### **Изложение основного материала**

Задачи, связанные с усталостной прочностью сварных узлов судового корпуса, являются комплексными и недостаточно изученными до настоящего времени. Данное обстоятельство служит причиной приближенности большинства существующих расчетных зависимостей, которые обобщают накопленные экспериментальные данные, а также расхождений в результатах, полученных с помощью различных методов и формул. Неопределенности и стохастический характер ряда расчетных параметров при абсолютных оценках усталостной прочности судокорпусных конструкций обусловили появление сравнительных расчетных методов оценки долговечности. Сравнительный анализ усталости основан на предположении, что, согласно данным эксплуатации, выбранная в качестве базовой конструкция имеет удовлетворительную усталостную прочность. Фактический ресурс базовой конструкции при этом является неизвестным, соответственно, неизвестным является и фактический ресурс исследуемой конструкции. Долговечность исследуемой конструкции выражается относительно долговечности базовой с помощью зависимостей, представленных в работах [1], [8], и должна быть не меньше базовой.

В настоящее время в рекомендациях классификационных обществ и международных организаций по расчету усталостной прочности сварных узлов представлены методы, основанные на подходе абсолютных оценок показателей усталости конструктивных узлов. К ним можно отнести методы номинального напряжения, конструктивного напряжения, деформационный, а также способы расчета на усталость, использующие эффективный коэффициент концентрации напряжений. Первая на просторах СНГ методика абсолютных оценок усталостной прочности конструкций корпуса судна была разработана в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в 80-е гг. XX в. [9]. Данная мето-

дика, в которой был обобщен большой объем экспериментальных данных, явилась важным шагом на пути для решения задач циклической прочности.

Для характеристики меры усталостного повреждения конструкции при ее нерегулярном нагружении используют понятие величины усталостного повреждения  $D$ , критический уровень которой соответствует появлению усталостной трещины или полному разрушению объекта. Расчет параметра  $D$  для всех указанных в данной работе методов принято выполнять с помощью гипотезы линейного суммирования повреждений, которая может быть представлена в различных формах. Критическое значение величины  $D$ , соответствующее появлению трещины, может быть установлено, согласно [2], для судокорпусных конструкций на уровне 1. Указанная гипотеза в «классическом варианте» для случаев стохастического нагружения с дискретным и непрерывным распределением случайных амплитуд  $\sigma_a$ , соответственно, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}; \\ D &= N^* \int_{\sigma_{amin}}^{\sigma_{amax}} \frac{p(\sigma_a)}{N(\sigma_a)} d\sigma_a, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $n_i$  — количество циклов нагружения уровня  $\sigma_{ai}$  в блоке  $i$ ;  $N_i$  — число циклов до усталостного разрушения при действии переменного напряжения постоянной амплитуды  $\sigma_{ai}$ ;  $p(\sigma_a)$  — плотность распределения вероятностей  $\sigma_a$ ;  $\sigma_{amin}$ ,  $\sigma_{amax}$  — пределы интегрирования.

При этом считается, что на кратковременных режимах морского волнения амплитуды случайного нагружения  $\sigma_a$  распределены по закону Рэлея, тогда как долговременное распределение  $\sigma_a$  соответствует закону Вейбулла.

Несколько отличная от остальных по структуре методика предложена в сборнике нормативно-методических материалов Российского морского регистра судоходства [10]. Согласно данной методике условие достаточной циклической прочности конструкции корпуса судна, которая воспринимает в общем случае усилия от действующих на корпус изгибающих и местных нагрузок с учетом различных режимов эксплуатации судна, определяется зависимостью

$$\sqrt[4]{\sum_{i=1}^n \bar{t}_i \left[ \left( \sigma_p^{\Sigma} \right)_i / \sigma_F \left( \sigma_c^{\Sigma} \right)_i \right]^4} \leq k_d, \quad (2)$$

где  $(\sigma_p^{\Sigma})_i$  — суммарная расчетная величина размахов переменных нормальных напряжений в точке рассматриваемой конструкции, в которой проверяется циклическая прочность и может возникнуть усталостное повреждение в  $i$ -м режиме эксплуатации;  $k_d$  — коэффициент допустимых напряжений,  $k_d = 1,4$  и  $1,5$ , — соответственно для продольных и поперечных связей корпуса судна;  $\sigma_F(\sigma_c^{\Sigma})_i$  — предел выносливости конструктивного узла в расчетной («горячей») точке (данная величина определяется с учетом влияния суммарной величины действующих средних напряжений  $(\sigma_c^{\Sigma})_i$  в  $i$ -м режиме эксплуатации от общих и местных нагрузок);  $\bar{t}_i$  — относительная доля времени эксплуатации судна в  $i$ -м режиме по отношению к общему сроку эксплуатации;  $n$  — число учитываемых расчетных режимов. Зависимости, рекомендации и справочные таблицы для определения  $\sigma_F(\sigma_c^{\Sigma})_i$  и других величин в формуле (2) можно найти в работе [10].

Методы расчета усталостной прочности, рассматриваемые в настоящей работе, могут отличаться между собой по показателю интенсивности накопления усталостного повреждения, связанного с количеством циклов нагружения до появления трещины. Следовательно, их можно классифицировать по данному параметру. Аналогичная классификация приведена в работе [1], однако она является достаточно общей и отображает разработанность проблемы циклической прочности, как уже указывалось ранее, по состоянию на 80-е гг. XX в. По типу показателя интенсивности накопления усталостного повреждения основные методы расчета усталостной прочности можно разделить на следующие группы.

1. Силовые, к которым относятся:

1.1. методы, основанные на использовании номинальных напряжений (метод номинального напряжения и экспериментально-теоретический метод, а также способы расчета на усталость, использующие эффективный коэффициент концентрации напряжений);

1.2. методы, использующие конструктивные напряжения.

2. Деформационные.

3. Энергетические.

4. Базирующиеся на применении понятий механики разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений в концентраторе,  $J$ -интеграл Райса).

Кроме того, все способы расчета на усталость судокорпусных конструкций, описанные в данной работе, можно разделить на такие, которые предполагают определение локальных напряжений, деформаций и т. п., и которые исключают этот локальный уровень. К последним можно отнести методы номинального и конструктивного напряжения, которые являются силовыми согласно представленной ранее классификации.

**Метод номинального напряжения.** Данный способ расчета циклической прочности предполагает типизацию исследуемого района корпуса судна, где возможно появление усталостного повреждения, в соответствии с классификацией, которая представлена в рекомендациях классификационных обществ или рекомендациях международных организаций по расчету усталостной прочности сварных соединений. Метод представлен, например, в рекомендациях Международного института сварки (IIW) [11], [12], Норвежского Веритаса (DNV) [13], [14], Национальной комиссии охраны здоровья и безопасности Британии (HSE) [12] и др. После типизации критических областей каждой такой области, согласно указанным выше рекомендациям, подбирается соответствующая  $S$ - $N$  кривая усталости. Данные кривые могут состоять из двух наклонных участков, одного наклонного и прямого второго или только из одного наклонного участка (в случае свободной коррозии [13]), в зависимости от ожидаемого числа циклов и характера нагружения (с постоянной или случайной амплитудой). Семейство  $S$ - $N$  кривых для расчета усталостной прочности стального объекта, который находится в воздухе и испытывает действие нагружения переменной амплитуды, представлено на рис. 1.

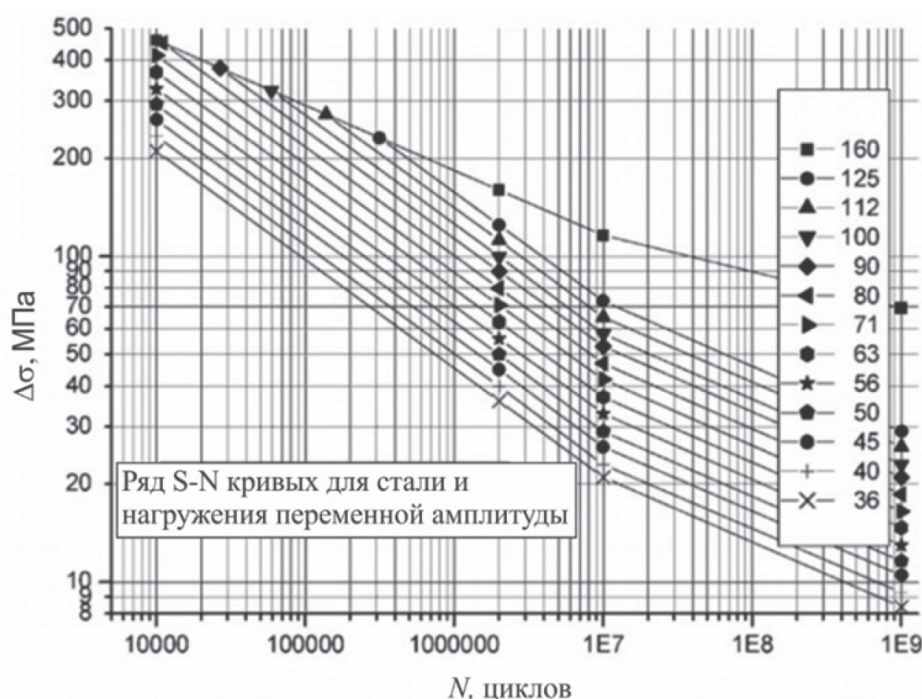


Рис. 1. Модифицированные  $S$ - $N$  кривые IIW для определения усталостного повреждения по правилу линейного суммирования повреждений (материал — сталь)

Кривые усталости для исследуемого узла подбираются независимо от механически характеристик стали, из которой он изготовлен. Такое упрощение, как отмечается в работе [5], является оправданным для острых концентраторов напряжений.  $S-N$  кривые, представленные в работах [11] – [13], могут быть использованы для оценки усталостной прочности сварных конструкций из сталей с пределом текучести  $\sigma_T < 960$  МПа. При этом величина размаха напряжений в цикле нагружения не должна превышать  $1,5\sigma_T$ , а максимальное номинальное напряжение цикла не должно быть больше  $\sigma_T$ , в противном случае целесообразно применять другие методы расчета.

Цифровой код FAT (fatigue class — класс усталости) присваивается сварному узлу в зависимости от его внешнего вида, способа нагружения, особенностей изготовления и др. Такой код соответствует пределу выносливости конструкции при  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Кривая усталости FAT 160 на рис. 1 является  $S-N$  кривой основного металла, ограничивающей другие кривые сверху. Кроме цифрового кода для кривых усталости может использоваться буквенно-цифровое обозначение, используемое в работах [12], [13].

Наклонные части  $S-N$  кривых описываются уравнением

$$\lg N = \lg C - m \cdot \lg \Delta\sigma_n, \quad (3)$$

где  $N$  — число циклов до появления трещины;  $\Delta\sigma_n$  — размах номинальных напряжений в цикле;  $\lg C$ ,  $m$  — константы, которые определены для буквенно-цифрового кода в соответствующих нормативных документах [11] – [13].

Описываемые  $S-N$  кривые позволяют рассчитать усталостную прочность конструкции так, что вероятность ее разрушения будет составлять  $P_f = 2,4$  %. Другим средством для расчета циклической прочности методом номинального напряжения являются нормализованные кривые усталости, как указывается в работе [5]. Особенности расчета долговечности сварных узлов в случае объемного напряженного состояния можно найти в работах [5], [11].

**Методы расчета усталостной прочности, которые базируются на использовании эффективных коэффициентов концентрации напряжений.** Эффективный коэффициент концентрации напряжений, в соответствии с данными, приведенными в работах [1], [4], показывает влияние концентрации напряжений на усталостную прочность и представляет отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости конструкции (физический смысл эффективного коэффициента концентрации поясняется в работах [1], [2], [4]). Данный коэффициент может использоваться для определения предела выносливости сварного узла, как например, в методике ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова (см. выше). Эффективный коэффициент концентрации напряжений  $K_e$  определяется экспериментально. Его оценки, как правило, выполняются на базе известного теоретического коэффициента концентрации  $K_t$ , который на практике определяется приближенными формулами, а также с помощью метода конечных или граничных элементов.

В зарубежной практике для оценки величины  $K_e$ , в соответствии с данными, приведенными в работах [5] и [15], используются методы критического расстояния, наиболее напряженного объема и осреднения напряжений. Последний из них предложен Нейбером и широко используется в формате метода фиктивного закругления концентратора напряжений. Данный способ расчета величины  $K_e$  был предложен Д. Радаем. Если заменить действительный радиус кривизны концентратора  $\rho$  фиктивным  $\rho_\phi$ , то, согласно данному способу, эффективный коэффициент концентрации напряжений можно определить, рассчитав величину  $K_t$  при таком  $\rho_\phi$ . Величина  $\rho_\phi$  рассчитывается по формуле

$$\rho_\phi = \rho + s\rho^*, \quad (4)$$

где  $\rho^*$  — радиус структурного элемента, т. е. такого минимального объема сферической формы, в котором еще может возникнуть усталостное повреждение;  $s$  — коэффициент жесткости напряженного состояния.

Здесь радиус структурного элемента  $\rho^* = 0,4$  мм — для низколегированной стали, а величина  $s = 2,5$  — для сварных соединений. В худшем случае радиус перехода от основного металла

к металлу сварного шва  $\rho$  в соединении стремится к нулю. Таким образом, получается, что для сварных соединений из указанных сталей в худшем случае фиктивный радиус  $\rho_f$  составляет 1 мм и, следовательно, на базе данного радиуса можно определять величину эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_e$  для сварных узлов с запасом в сторону завышения.

Надежность метода фиктивного закругления концентратора напряжений в описанной форме была подтверждена на примере его использования для исследования сварных узлов с  $T$ - и  $Y$ -образными сечениями, согласно работе [5]. Изначально предполагалось описанный метод использовать только для определения предела выносливости при  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружения постоянной амплитуды. Однако со временем, как указывается в работе [15], метод был расширен для расчета усталостной прочности в области до  $10^4$  циклов на базе единой  $S$ - $N$  кривой FAT 225 для стальных конструкций. Такая кривая позволяет выполнить расчет на усталость, пользуясь главными максимальными напряжениями в очаге концентрации. Поправки вследствие эффекта толщины в данном случае не нужны. Эффект остаточных напряжений здесь является включенным в кривую класса 225. Наклонные участки данной кривой описываются аналогичной формуле (4) зависимостью.

Обобщенная схема расчета усталостной прочности сварного узла методом фиктивного закругления очага концентрации из работы [16] приведена на рис. 2.

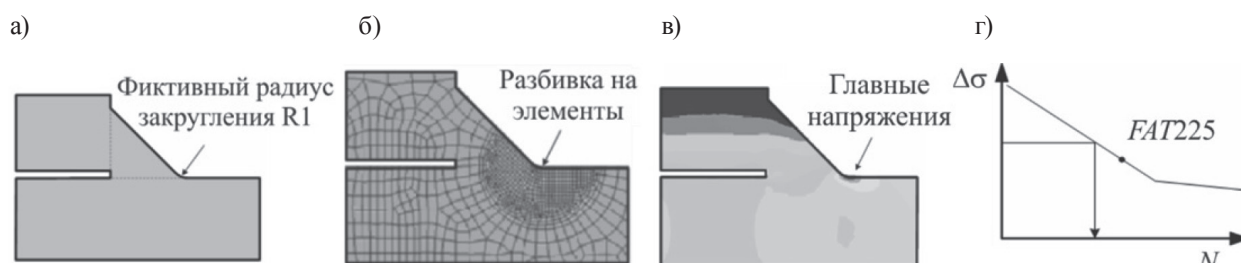


Рис. 2. Этапы расчета усталостной прочности стальной конструкции с использованием метода фиктивного закругления очага концентрации:

- а — создание геометрической модели с фиктивным закруглением очага концентрации;
- б — разбивка геометрической модели на конечные элементы;
- в — определение величины максимальных главных напряжений в концентраторе;
- г — расчет количества циклов до появления трещины усталости с помощью  $S$ - $N$  кривой FAT 225

**Экспериментально-теоретический метод.** Данный способ расчета усталостной прочности сварных конструктивных узлов корпуса судна, представленный в изданиях [17] – [20], был разработан в Национальном университете кораблестроения им. адм. Макарова. Исходным объектом метода является не узел в целом, а присутствующие в нем отдельные очаги концентрации напряжений, наиболее слабым из которых определяется усталостная прочность узла и, соответственно, всей конструкции. Главным элементом в такой расчетной методике оценки долговечности является кривая усталости очага концентрации.

Кривая усталости, построенная согласно данному методу, которая представлена на рис. 3, состоит из трех участков. Она строится на базе критериальных зависимостей усталости материала с использованием экспериментальных данных испытаний на усталость натурных или полунатурных моделей при заданном уровне номинальных напряжений. Указанная кривая усталости отображается в полулогарифмической системе координат:  $n = \lg N$  и  $\bar{\sigma}_n = \Delta \bar{\sigma}_n / \Delta \bar{\sigma}_{n0}$ . Участок I кривой строится посредством соединения прямой линией в полулогарифмической системе координат двух точек. Первая — граничная левая точка участка II, которая характеризует циклическую прочность узла при максимальных номинальных напряжениях цикла равных пределу текучести материала  $\sigma_T$ . Вторая точка соответствует достижению максимальных номинальных напряжений цикла предела прочности  $\sigma_B$  при  $n = 0$ . Для построения участка II кривой используется деформационный критерий усталости материала, предложенный Ленджером, для участка III — силовой

критерий Хейвуда. При этом «привязка» к результатам циклических испытаний типового очага концентрации напряжений происходит на участке II в точке с координатой  $n_0$ . Индекс «0» при  $\Delta\sigma_{n0}$  и  $n_0$  означает, что данные величины относятся к экспериментальным данным:  $\Delta\sigma_{n0}$  — размах номинальных напряжений, которые имели место в модели, при испытании на усталость которой было установлено число циклов  $N_0$  до появления трещины длиной 1 ... 2 мм.

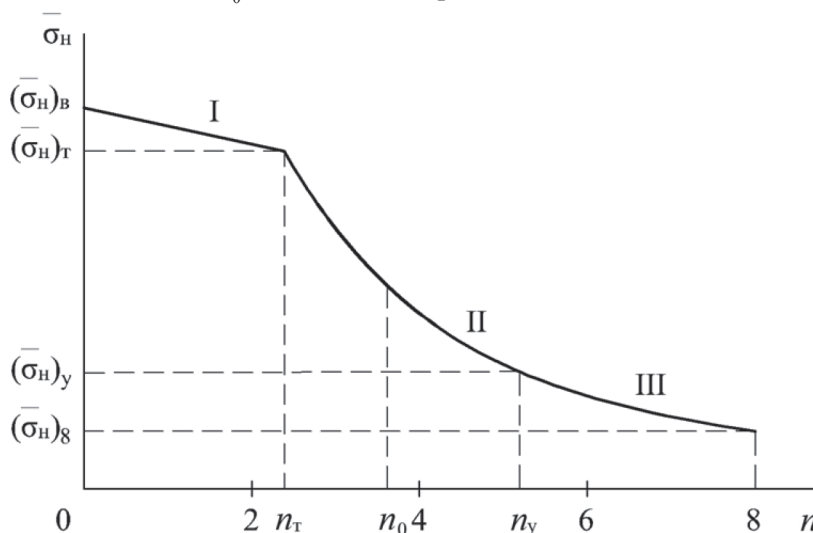


Рис. 3. Кривая усталости согласно экспериментально-теоретическому методу

Расчетные зависимости для каждого участка кривой имеют следующий вид:

— для участка I

$$\bar{\sigma}_H = \left(1 - \frac{n}{B}\right) (\bar{\sigma}_H)_B \quad (5)$$

границные точки:  $((\bar{\sigma}_H)_B; 0)$  и  $((\bar{\sigma}_H)_T; n_T)$ ;

— для участка II

$$\bar{\sigma}_H = \left\{ \frac{1 + (\bar{\psi} / N^{0.5})}{\varphi [1 + (\bar{\psi} / N_0^{0.5})]} \right\}^{1/s} \quad (6)$$

границные точки:  $((\bar{\sigma}_H)_T; n_T)$  и  $((\bar{\sigma}_H)_y; n_y)$ ;

— для участка III

$$\bar{\sigma}_H = \bar{\sigma}_B \left[ \frac{2(1 + \beta n^4)}{1 + \alpha n^4} - \delta(n - n_y) \right] \quad (7)$$

границные точки:  $((\bar{\sigma}_H)_y; n_y)$  и  $((\bar{\sigma}_H)_8; n_8)$ .

Кроме того, следует отметить, что участок II строится на основе предположения о том, что при максимальных номинальных напряжениях цикла, значения которых меньше предела текучести, размах упругопластической деформации в очаге изменяется по следующей зависимости:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 \varphi \left( \frac{\Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_{n0}} \right)^i, \quad (8)$$

где  $\varphi$  — функция, учитывающая отличия геометрических и механических характеристик исследуемой конструкции и испытанной на усталость модели.

Данная функция определяется следующим образом:

$$\varphi = \frac{K_t^{2/(1+m)} \sigma_{T0}^{(1-m)/(1+m)}}{K_{T0}^{2/(1+m)} \sigma_T^{(1-m)/(1+m)}}, \quad (9)$$

здесь  $K_t$ ,  $K_{T0}$  — теоретические коэффициенты концентрации напряжений для исследуемой конструкции и испытанной модели;  $m$ ,  $m_0$  — показатели степени для степенной аппроксимации диаграммы деформирования материала конструкции и модели;  $\sigma_{T0}$  — предел текучести материала модели.

Зависимости для определения других переменных в выражениях (5) – (7) и остальные обозначения можно найти, например, в источнике [20].

**Методы расчета усталостной прочности, которые базируются на использовании конструктивных напряжений.** Конструктивными можно назвать такие напряжения, которые в случае со сварными узлами не зависят от радиуса перехода от основного металла к металлу шва, а определяются только соотношениями общих размеров конструкции.

В настоящее время наиболее распространенным на практике является метод напряжений в «горячей» точке. Данный метод предполагает определение конструктивных напряжений в сварном узле с помощью специальных приемов, основанных на использовании метода конечных элементов, или с помощью использования экспериментального способа. Данные напряжения включают эффекты макроконцентрации напряжений (общей геометрии и формы конструкции) и исключают прирост напряжений, обусловленный наличием сварного шва. Предполагается, что влияние наличия сварного шва на усталостную прочность сварного узла по данному методу уже учтено в используемых в расчете долговечности  $S-N$  кривых определенного класса усталости FAT, как указывается в работах [2], [7].

Конструктивные напряжения в «горячей» точке определяют экстраполяцией напряжений из специальных точек, положение которых регламентируется соответствующими рекомендациями, приведенными в работах [11], [12], [14], [21]. Экстраполяция может быть линейной или квадратичной, по двум или трем точкам соответственно. Общая схема линейной экстраполяции представлена на рис. 4.

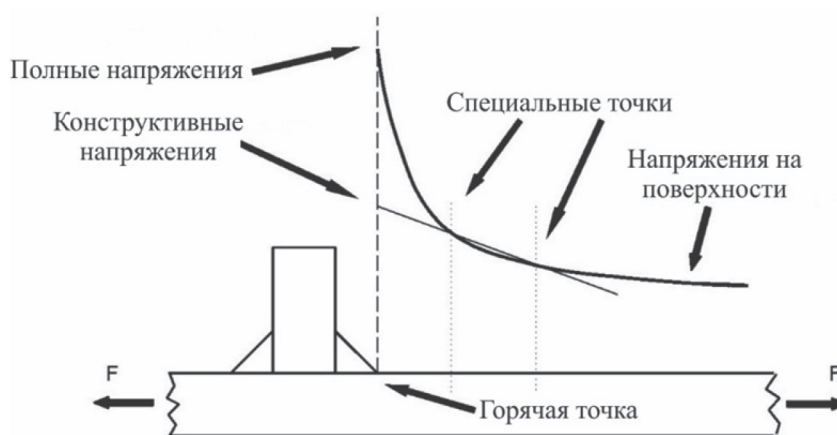


Рис. 4. Определение конструктивных напряжений в «горячей» точке посредством линейной экстраполяции

В соответствии с данными работы [11] существует два типа «горячих» точек: «горячая» точка в месте перехода от основного металла к металлу шва на поверхности пластины — точка типа «а»; «горячая» точка в таком же месте перехода на ребре пластины — точка типа «b».

При определении конструктивных напряжений в «горячей» точке типа «а» напряжения, по которым будет выполняться экстраполяция, устанавливаются экспериментально или с использованием метода конечных элементов в специальных точках на поверхности пластины (см. рис. 4).

Положение данных точек назначается в пропорциях от ее толщины согласно данным, приведенным в работах [11], [21]. В случае «горячих» точек типа «b», положение соответствующих точек экстраполяции назначается независимо от толщины пластины, на ребре которой они находятся [21]. Рекомендации по расчету конструктивных напряжений  $\sigma_{hs}$  методом конечных элементов с помощью программных пакетов САЕ относительно выбора типа конечных элементов, плотности их распределения, положения точек экстраполяции и формулы для расчета данных напряжений можно найти в работах [11], [14], [21]. Кроме того, в работах [11], [21], [22] можно найти подобные рекомендации для определения  $\sigma_{hs}$  экспериментальным путем. Расчетные значения размаха  $\Delta\sigma_{hs}$ , как указывается в работе [11], не должны превышать  $2\sigma_T$ .

Другие способы расчета конструктивных напряжений в сварных узлах рассмотрены в работе [5]. Классификация  $S-N$  кривых для расчета усталостной прочности методом напряжения в «горячей» точке представлена, например, в работах [11], [21] для распространенных на практике узлов. Как указано в работе [12], для расчета по данному методу также могут быть использованы кривые усталости, используемые в методе номинального напряжения, а также кривые, полученные из других источников, где имеются данные циклической прочности эталонного узла.

**Деформационный метод.** Нарушение усталостной прочности при развитой макропластической деформации в циклах нагружения называют в работе [3] *малоцикловой усталостью*. Упруго-пластическое деформирование может происходить в зонах концентрации при упругом деформировании всей конструкции. Разрушение в этих случаях будет иметь место при небольших числах циклов. Для оценки усталостной прочности узла, работающего в таких условиях, и применяется, как правило, деформационный метод. Допущения, на которых он основан, предполагают, что поведение материала в очаге концентрации при циклическом нагружении конструкции сопоставляется с поведением сравнительных образцов малых размеров без концентрации напряжений или с небольшим ее уровнем, которые испытываются при одноосном переменном нагружении. Таким образом, расчет усталостной прочности с помощью данного метода заключается в определении переменных деформаций в очаге концентрации и расчете числа циклов до появления усталостной трещины с помощью  $\epsilon-N$  кривой, полученной при циклических испытаниях образцов малых размеров, которая связывает размах полной деформации  $\Delta\epsilon$  или пластической деформации  $\Delta\epsilon_p$  с количеством циклов до появления трещины  $N$ .

В работах [1], [3] – [5], [23] представлены варианты зависимости  $\Delta\epsilon(N)$  для характеристики циклического поведения материала в зоне концентрации. Один из вариантов — критерий Мэнсона, который имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c, \quad (10)$$

где  $\sigma'_f$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $b$ ,  $c$  — величины, определяемые с помощью испытаний на усталость указанных малых образцов или приближенными оценками [5], [22] (типовые значения этих коэффициентов для различных типов стали и других сплавов можно найти, например, в работах [1], [3], [5], [24], [25]);  $E$  — модуль упругости материала.

Зависимости и рекомендации для учета в анализе усталостной прочности сварных конструкций деформационным методом остаточных напряжений и релаксации средних напряжений можно найти в работе [5]. Для связи циклических напряжений и деформаций в зоне концентрации используется циклическая кривая материала, которая может быть аппроксимирована, например, зависимостью Рэмберга и Осгуда следующего вида:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'}, \quad (11)$$

где  $\Delta\sigma$  — размах напряжений;  $K'$  — коэффициент циклического деформационного упрочнения;  $n'$  — показатель степени циклического деформационного упрочнения.

Местные напряжения и деформации предлагается определять с помощью хорошо известной приближенной формулы Нейбера. При этом в работе [5] приводятся ее варианты для случаев

острых и неострых концентраторов, а также полной пластификации сечения. Кроме того, для связи номинальных и локальных напряжений при упругопластическом поведении материала в концентраторе, как указывается в работах [5], [23], может быть использована аппроксимация Глинки. При расчете усталостной прочности в представленных выше формулах деформационного метода, согласно данным работ [5], [23], теоретический коэффициент концентрации напряжений  $K_t$  заменяется эффективным  $K_e$ .

Для учета средних напряжений цикла при расчете на усталость деформационным методом, согласно работам [5], [23], может быть применена зависимость (14) с поправкой Морроу. Другая зависимость, которая позволяет учесть влияние средних напряжений при расчете на усталость, была предложена Смитом, Уотсоном и Топпером. Она построена на предположении, что произведение максимального напряжения цикла и амплитуды деформации  $\sigma_{\max} \cdot \Delta \epsilon / 2$  является постоянным для заданной долговечности и имеет следующий вид:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon}{2} E = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f E (2N_f)^{b+c}. \quad (12)$$

Кроме описанных ранее зависимостей деформационного метода могут использоваться их усовершенствованные варианты, которые позволяют ввести в расчет факторы масштаба пластического деформирования и вида напряженного состояния. Такие зависимости представлены, например, в работах [1], [6], однако они включают ряд эмпирических параметров, что может ограничивать их практическое использование.

**Другие методы и компьютерные пакеты для решения задач усталостной прочности сварных конструктивных узлов.** Для описания и оценки усталостной прочности сварных конструкций, как указывается в источнике [5], могут быть использованы коэффициенты интенсивности напряжений в концентраторе (хорошо известная концепция, которая позволяет описывать сингулярное поле напряжений в вершинах трещин),  $J$ -интеграл Райса или плотность энергии деформации. Метод интенсивности локальных напряжений в концентраторе, согласно данным работы [5], является сравнительно новым и в данное время не все его аспекты достаточно изучены.

Следует отметить, что во многих расчетных комплексах конечно-элементного анализа предусмотрены специальные инструменты и модули для решения задач усталостной прочности. Примерами таких расчетных комплексов, согласно данным источников [26] – [28], являются ANSYS, прикладной модуль Simulation системы Solidworks, а также специализированный для решения задач усталостной прочности комплекс nCode DesignLife, который является довольно мощным инструментом с широкими возможностями.

**Анализ результатов расчета судокорпусных узлов, полученных различными методами.** Усталостные повреждения  $D$ , определенные с помощью некоторых из рассмотренных в данной работе методов расчета усталостной прочности, сравнивались между собой в исследованиях [6] и [29]. Результаты сравнения сведены в следующую таблицу.

**Результаты расчета усталостного повреждения судокорпусных узлов**

| Тип узла                                                  | Величина усталостного повреждения $D$ |                                                         |                      |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|
|                                                           | Метод напряжения в «горячей» точке    | Метод эффективного коэффициента концентрации напряжений | Деформационный метод |
| Конструкция 1 в работе [6]                                | 1,68                                  | 0,538                                                   | 0,398                |
| Конструкция 2 в работе [6]                                | –                                     | 0,746                                                   | 0,024                |
| Конструкция 3 в работе [29]<br>(конструктивный вариант 2) | –                                     | 1,467                                                   | 1,396                |
| Конструкция 3 в работе [29]<br>(конструктивный вариант 4) | –                                     | 0,581                                                   | 0,3                  |

Так, в исследовании [6] для соединения продольного ребра жесткости верхней палубы с поперечной переборкой, подкрепленного кницей (конструкция 1 в таблице) были рассчитаны

величины  $D$  с помощью методов напряжения в «горячей» точке, фиктивного закругления очага концентрации напряжений и деформационного. Значения  $D$ , определенные способом расчета циклической прочности, использующим эффективный коэффициент концентрации напряжений, и деформационным методом, сравнивались в работе [6] на примере углового участка выреза люка в верхней палубе судового корпуса (конструкция 2 в таблице). Аналогичное сравнение было выполнено в исследовании [29] для конструкции скользящего соединения стенок надстройки корпуса судна (конструкция 3 в таблице). В случае последних двух типов узлов наиболее напряженный участок приходился на район, не содержащий сварного шва, по этой причине концепция «горячей» точки не использовалась. В работе [29] исследовано пять конструктивных вариантов скользящего соединения стенок надстройки корпуса судна, в таблице приведены результаты для двух из них: конструктивных вариантов 2 и 4.

### Обсуждение основных результатов

В работе описаны основные методы расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна, которые используются в мировой практике, экспериментально-теоретический и некоторые новые.

Расчет циклической прочности посредством сравнительного анализа и ранние способы расчета, базирующиеся на абсолютных оценках (ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, номинального напряжения), основаны на ряде допущений и позволяют получить лишь ориентировочные оценки усталостного повреждения узла корпуса судна [2]. Так, метод номинального напряжения не позволяет принять в расчет индивидуальные свойства материала конкретной конструкции, лишь приближенно учитывает ее геометрические особенности, условия изготовления и др.

Методы напряжения в «горячей» точке и фиктивного закругления очага концентрации напряжений являются более совершенными за счет применения расчетных САЕ комплексов для моделирования геометрии узлов, хоть и имеют ряд ограничений на использование. Наибольшим недостатком схемы расчета циклической прочности с использованием напряжений в «горячей» точке является игнорирование механизмов усталостного повреждения и расчет исходя из предположения об макроскопически упругой деформации области, которая содержит место развитие повреждения. Предположение о том, что влияние сварного шва на циклическую прочность конструкции учитывается с помощью  $S-N$  кривой соответствующего класса усталости, позволяет лишь приближенно учесть передачу усилий в соединении и эффекты микропластической деформации [2]. Одним из преимуществ схемы расчета на усталость, использующей фиктивное закругление концентратора напряжений, является применение в расчетах всего одной  $S-N$  кривой для данного материала и условий эксплуатации (на воздухе, в морской воде, при наличии катодной защиты). Однако, естественно, что использование «универсального радиуса» перехода, равного 1 мм от основного металла к металлу шва, может привести к отличным от эксперимента результатам.

Деформационный метод расчета усталостной прочности рекомендуется для расчетов корпусных конструкций согласно исследованию [6], в то же время в данной работе указывается на необходимость его дальнейшего совершенствования. Очевидно, что для получения с помощью данного метода результатов, наиболее близких к экспериментальным, необходимо обладать циклическими и статическими характеристиками металла в вероятной зоне появления трещины (обычно зона сплавления основного металла и металла шва), которые получить на практике довольно сложно. Приближенным является также учет влияния на долговечность остаточных напряжений, асимметрии цикла нагружения, масштаба пластического деформирования, градиента напряжений и вида напряженного состояния. Данные факторы могут вообще не приниматься во внимание в зависимости от используемых расчетных формул и наличия информации о величинах соответствующих эмпирических параметров материала конструкции. Другой источник ошибок может быть связан с тем, что анализ усталости данным способом выполняется, как правило,

для идеализированной геометрии, а наличие дефектов может быть принято в расчет лишь с помощью приближенных зависимостей.

Расчетные комплексы решения задач усталостной прочности используют указанные ранее методы и позволяют наглядно визуализировать и частично автоматизировать результаты.

Экспериментально-теоретический метод также имеет в своей основе деформационный критерий усталости материала и формулу Нейбера, однако «привязка» к данным эксперимента корректирует соответствующую кривую усталости, косвенно принимая, таким образом, в расчет ряд указанных ранее факторов, оказывающих влияние на циклическую прочность, которые сложно или невозможно учесть аналитически в деформационном методе. Данный способ расчета позволяет получить кривую усталости сварного узла в районе  $1 \dots 10^8$  циклов, используя лишь небольшое количество испытаний эталонного узла, проведенных при высоких уровнях размаха напряжений, для выполнения «привязки».

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений в исследуемом узле и циклически испытанной модели при этом также, очевидно, должны определяться для идеализированной геометрии. При этом необходимо производить замеры и статистическую обработку радиусов и углов наклона профиля шва в месте перехода от основного металла к металлу шва в модели либо иметь типовые величины данных параметров при различной обеспеченности для сварных швов.

Учитывая, что экспериментально-теоретический метод использует для анализа усталости сварных узлов теоретические коэффициенты концентрации напряжений, для уменьшения трудозатрат в процессе определения данных коэффициентов, следует владеть упрощенными методиками их определения. Такие методики должны предполагать минимальное использование расчетных комплексов анализа конструкций методом конечных элементов.

Отдельное исследование следует посвятить необходимости и целесообразности учета средних напряжений при использовании экспериментально-теоретического метода для построения кривой усталости узла корпуса судна на втором (малоцикловом) ее участке, где предполагается режим «жесткого» малоциклового нагружения и влиянием среднего напряжения цикла на усталость пренебрегают.

### Выводы

Одним из преимуществ экспериментально-теоретического метода расчета усталостной прочности конструкций корпуса судна по сравнению с другими является то, что он позволяет решать все типы задач расчета на усталость, которые имеют место на практике:

- задачу оценки циклической прочности при наличии данных о нагружении и всех характеристиках узла;
- проектировочную из условия обеспечения необходимой долговечности при неизвестных геометрических параметрах конструкции;
- задачу определения допустимого нагружения из условия обеспечения усталостной прочности.

В то же время не все из описанных в работе способов расчета на усталость хорошо подходят для решения всех трех указанных задач.

Другим его преимуществом является комбинированная кривая усталости, которая строится с учетом того, что для расчетов в малоцикловой области используются, как правило, деформационные методы, а для оценки циклической прочности при упругом деформировании в концентраторе — силовые. Такая кривая корректируется с помощью «привязки» к результатам циклических испытаний моделей конструктивных узлов, схожих с исследуемым. Таким образом, экспериментально-теоретический метод расчета усталостной прочности судокорпусных конструкций можно считать предпочтительным в сравнении с другими основными методами, используемыми в расчетной практике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петин С. В.* Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций / С. В. Петин. — Л.: Судостроение, 1990. — 224 с.
2. *Петин С. В.* Эксплуатационная прочность и надежность конструкций: в 2 ч. / С. В. Петин. — Ч. 1. — СПб.: Политехнический университет, 2012. — 89 с.
3. *Петин С. В.* Эксплуатационная прочность и надежность конструкций / С. В. Петин. — Ч. 2. — СПб.: Политехнический университет, 2012. — 48 с.
4. *Копельман Л. А.* Основы теории прочности сварных конструкций: учеб. пособие. — 2-е изд., испр. / Л. А. Копельман — СПб.: Лань, 2010. — 464 с.
5. *Radaj D.* Fatigue assessment of welded joints by local approaches / D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke. — 2<sup>nd</sup> ed. — Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2006. — 639 p.
6. *Petinov S. V.* Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems / S. V. Petinov, I. M. Afanasyeva // Proc. of the International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics-2010». — SPb., 2010. — Pp. 519–525.
7. *Kozak J.* Fatigue strength determination of ship structural joints / J. Kozak, Z. Górski // Polish Maritime Research. — 2011. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 28–36. DOI: 10.2478/v10012-011-0009-8.
8. *Максимаджи А. И.* Низколегированная сталь в судостроении / А. И. Максимаджи, О. А. Новиков, Л. Г. Соколов. — Л.: Судостроение, 1964. — 300 с.
9. *Бойцов Г. В.* Прочность и конструкция судов новых типов / Г. В. Бойцов, О. М. Палий. — Л.: Судостроение, 1979. — 360 с.
10. Российский морской регистр судоходства: сб. нормативно-метод. материалов. Кн. одиннадцатая. — НД No. 2-139902-016. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2002. — 151 с.
11. *Hobbacher A.* Recommendations for fatigue design of welded joints and components / A. Hobbacher. — Paris, France: International Institute of Welding, 2008. — 144 p.
12. Fatigue assessment of ship structures // IACS Recommendation. — No. 56. — 1999. — 27 p.
13. DNV Fatigue Design of Offshore Steel Structures // Recommended Practice (RP-C203). — Norway: Det Norske Veritas, 2006. — 126 p.
14. DNV Fatigue Assessment of Ship Structures // Recommended Practice (Classification notes No. 30.7). — Norway: Det Norske Veritas, 2010. — 108 p.
15. *Fricke W.* Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures / W. Fricke // International Institute of Welding. — IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. — Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010. — 144 p.
16. *Pedersen M. M.* Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints / M. M. Pedersen, O. O. Mouritsen, M. R. Hansen, J. G. Andersen // Proceedings of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures. — Borlänge, Sweden, 2010. — Pp. 1–11.
17. *Коростылёв Л. И.* О расчетной оценке усталостной прочности конструктивных узлов судового корпуса / Л. И. Коростылев, В. П. Суслов, Н. А. Штырев // Строительная механика корабля: тр. НКИ. — Николаев, 1987. — С. 35–42.
18. *Коростылёв Л. И.* Оценка усталостной прочности судовых корпусных конструкций с концентраторами напряжений / Л. И. Коростылев // Вторая международная конференция по судостроению — ISC'98: труды, секция С. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1998. — С. 160–167.
19. *Коростылёв Л. И.* Практическая реализация экспериментально-теоретического метода расчетной оценки усталостной долговечности судовых конструкций / Л. И. Коростылев // Зб. наук. праць УДМУ. — 1998. — № 3 (351). — С. 3–9.
20. *Коростылёв Л. И.* Оценка усталостной прочности сварных узлов тонкостенных конструкций в многоциклового области / Л. И. Коростылёв, С. Ю. Клименков // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: збірник наукових праць ДНУ ім. О. Гончара. — 2010. — № 11 (352). — С. 152–159.
21. *Niemi E.* Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00) / E. Niemi, W. Fricke, S. J. Maddox. — Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006. — 49 p.
22. Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components (IIW doc. IIS/IIW-1221-93) / Ed. E. Niemi. — Cambridge, England: Abington Publishing, 1995. — 80 p.

23. *Stephens R. I.* Metal fatigue in engineering / R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs. — 2<sup>nd</sup> ed. — Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2001. — 473 p.
24. *Manson S. S.* Fatigue and durability of structural materials / S. S. Manson, G. R. Halford. — ASM International, 2006. — 457 p.
25. *Suresh S.* Fatigue of Materials / S. Suresh. — Second edition. — Cambridge University Press, 2006. — 679 p.
26. *Browell R.* Calculation and displaying fatigue results / R. Browell, Al. Hancq. — ANSYS, Inc., 2006. — 42 p.
27. *Берендеев Н. Н.* Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности: учеб.-метод. материалы по программе «Информационные системы в математике и механике» / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород, 2006. — 84 с.
28. *Берендеев Н. Н.* Методы решения задач усталости в пакете ANSYS WORKBENCH®: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет, 2012. — 64 с.
29. *Гучинский Р. В.* Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности / Р. В. Гучинский, С. В. Петин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 159. — С. 177–186.

## ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF METHODS FOR DETERMINING FATIGUE STRENGTH OF THIN-WALLED SHIP STRUCTURES

*The existing methods for the determining the fatigue strength of ship structures have been reviewed and analysed. These methods include nominal stress, comparative analysis, experimental and theoretic, notch stress, notch strain, hot spot stress, strain energy density based fatigue assessment approaches and also fracture mechanics based approach. The fatigue assessment technique presented in the Russian Maritime Register of Shipping is reviewed as well. Advantages and disadvantages of these methods are revealed and pointed out. Their classification by the type of the indicator of the intensity of fatigue damage accumulation is suggested. The suitability of mentioned techniques for solving practical problems of fatigue strength of ship structures is analysed. The values of fatigue damage assessment results obtained with hot spot stress, notch stress and notch strain fatigue strength assessment approaches for different ship structures are compared. The potential ways of improving of the experimental and theoretic method for ship structures fatigue strength assessment are determined.*

*Keywords: welded assembly, fatigue strength, fatigue strength assessment methods, stress concentration factor, fatigue crack, structural stress, nominal stress.*

### REFERENCES

1. Petinov, S. V. *Osnovy inzhenernykh raschetov ustalosti sudovykh konstruktsiy*. L.: Sudostroenie, 1990.
2. Petinov, S. V. *Ekspluatatsionnaya prochnost i nadezhnost konstruktsiy*. Part 1. SPb.: St. Petersburg Polytechnic University, 2012.
3. Petinov, S. V. *Ekspluatatsionnaya prochnost i nadezhnost konstruktsiy*. Part 2. SPb.: St. Petersburg Polytechnic University, 2012.
4. Kopelman, L. A. *Osnovy teorii prochnosti svarnykh konstruktsiy*. 2<sup>nd</sup> ed. SPb.: «Lan», 2010.
5. Radaj, D., C. M. Sonsino, and W. Fricke. *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd., 2006.
6. Petinov, S. V., and I. M. Afanasyeva. “Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems.” *Proc. of the International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics-2010»*. SPb., 2010: 519–525.
7. Kozak, J., and Z. Górski. “Fatigue strength determination of ship structural joints.” *Polish Maritime Research* 18.2 (2011): 28–36. DOI: 10.2478/v10012-011-0009-8
8. Maksimadzhi, A. I., O. A. Novikov, and L. G. Sokolov. *Nizkolegirovannaya stal v sudostroenii*. L.: Sudostroenie, 1964.
9. Boitsov, G. V., and O. M. Paliy. *Prochnost i konstruktsiya sudov novykh tipov*. L.: Sudostroenie, 1979.
10. *Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Sbornik normativno-metodicheskikh materialov*. ND No 2-139902-016. Vol. 11. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping Publ., 2002.

11. Hobbacher, A. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Paris, France: International Institute of Welding, 2008.
12. *Fatigue assessment of ship structures*. IACS Recommendation No. 56. July 1999.
13. *Recommended practice DNV-RP-C203. Fatigue design of offshore steel structures*. Norway: Det Norske Veritas, 2006.
14. *Recommended Practice Classification notes No. 30.7. Fatigue Assessment of Ship Structures*. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
15. Fricke, W. *Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures* IIW document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. Hamburg University of Technology Ship Structural Design and Analysis, July 2010.
16. Pedersen, M. M., O. O. Mouritsen, M. R. Hansen, and J. G. Andersen. "Experience with the Notch Stress Approach for Fatigue Assessment of Welded Joints." *Proc. of the Swedish Conference on Lightweight Optimized Welded Structures*. Borlänge, Sweden, 2010: 1–11.
17. Korostylev, L. I., V. P. Suslov, and N. A. Shtyrev. "O raschetnoy otsenke ustalostnoy prochnosti konstruktivnykh uzlov sudovogo korpusa." *Stroitel'naya mehanika korablja: tr. NKI. Nikolaev*, 1987: 35–42.
18. Korostylev, L. I. "Otsenka ustalostnoy prochnosti sudovykh korpusnykh konstruktсий s kontsentratorami napryazheniy." *Vtoraja mezhdunar. konf. po sudostroeniju — ISC'98: Trudy, Sekcija S*. SPb.: CNII im. akad. A. N. Krylova, 1998: 160–167.
19. Korostylev, L. I. "Prakticheskaya realizatsiya eksperimentalno-teoreticheskogo metoda raschetnoy otsenki ustalostnoy dolgovechnosti sudovykh konstruktсий." *Zb. nauk. prac' UDMTU* 3(351) (1998): 3–9.
20. Korostylev, L. I., and S. Yu. Klimenkov. "Otsenka ustalostnoy prochnosti svarnykh uzlov tonkostennykh konstruktсий v mnogotsiklovoy oblasti." *Metody' razv'yazuvannyya pry'kladny'x zadach mexaniky' deformivnogo tverdogo tila: zbirny'k naukovy'x prac' DNU im. O. Gonchara* 11(352) (2010): 152–159.
21. Niemi, E., W. Fricke, and S. J. Maddox. *Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-spot Stress Approach (IIW-1430-00)*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006.
22. Niemi E., ed. *Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components (IIW doc. IIS/IIW-1221-93)*. Cambridge, England: Abington Publishing, 1995.
23. Stephens, Ralph I., Ali Fatemi, Robert R. Stephens, and Henry O. Fuchs. *Metal fatigue in engineering*. 2<sup>nd</sup> ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
24. Manson, S. S., and G. R. Halford. *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International, 2006.
25. Suresh, S. *Fatigue of Materials*. Second edition. Cambridge University Press, 2006.
26. Browell, R., and Al Hancq. *Calculating and displaying fatigue results*. ANSYS, Inc., 2006.
27. Berendelev, N. N. *Primenenie systemi ANSYS k ocenke ustalostnoy dolgovechnosti*. Nizhny Novgorod, 2006.
28. Berendelev, N. N. *Metody resheniya zadach ustalosti v pakete ANSYS WORKBENCH ®: uchebno-metodicheskoe posobie*. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2012.
29. Guchinskij, R. V., and S. V. Petinov. "Razrabotka uzla konstrukcii sudna po usloviju ustalostnoj dolgovechnosti." *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta* 159 (2012): 177–186.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коростылёв Леонтий Иванович —  
доктор технических наук, профессор.  
Национальный университет кораблестроения  
имени адмирала Макарова  
leontyy.korostilyov@nuos.edu.ua  
Литвиненко Дмитрий Юрьевич — аспирант.  
Научный руководитель:  
Коростылёв Леонтий Иванович.  
Национальный университет кораблестроения  
имени адмирала Макарова  
litvinen@inbox.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korostylev Leonty Ivanovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding  
leontyy.korostilyov@nuos.edu.ua  
Litvinenko Dmitry Yurievich — postgraduate.  
Supervisor:  
Korostylev Leonty Ivanovich.  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding  
litvinen@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

## РАСЧЁТ БОКОВЫХ КЛЕТОК ПРИ СМЕЩЕНИИ СУДНА В ДОКЕ

*В работе решена задача определения реакций боковых клеток при смещении диаметральной плоскости (ДП) судна относительно ДП докового опорного устройства (ДОУ). Реакция каждой отдельной клетки, с учётом её индивидуальных характеристик, рассчитывается из условий статического равновесия судна и зависимостей, связывающих реакции и просадки доковых опор. При традиционном же подходе к расчёту все клетки одного борта заменяются одной точечной опорой, а для определения их минимального количества нормативно вводится коэффициент неравномерности.*

*Для условного транспортного судна водоизмещением 5000 т выполнено шесть вариантов расчёта, отличающихся углами килеватости днища — как одинаковыми в районе установки клеток, так и увеличенными в оконечностях. Количество клеток во всех вариантах составляет пять пар. Смещения судна варьировались от 0 до 500 мм, что соответствует реально возможным величинам. Представлены зависимости реакций отдельных клеток обоих бортов от величины смещения. Кренящие моменты, вызываемые другими причинами, не рассматривались. Показано, что даже при умеренных смещениях коэффициент неравномерности нагрузок на клетки может намного превышать нормативные значения. Наиболее неблагоприятны сочетания клеток с малыми углами наклона и значительным удалением от ДП в средней части судна и крутых, расположенных ближе к ДП клеток в оконечностях.*

*Ключевые слова:* доки, доковое опорное устройство, боковые клетки, кренящие моменты, опорные реакции, коэффициент неравномерности.

### Введение

Постановка судов в док на килевую дорожку и боковые клетки получила более широкое распространение по сравнению со способами, предполагающими использование бортовых распор, механизированных балочных опор и др. Принципы проектирования и конструирования ДОУ в нашей стране регламентируются отраслевым руководящим документом [1]. Он предусматривает, что, как правило, килевая дорожка должна рассчитываться на восприятие нагрузки от докового веса судна, а клетки должны предохранять его от опрокидывания. Этот же принцип был заложен в более ранний документ [2] и развивался Г. Н. Финкелем в монографии [3].

Нормативные документы допускают возможность в особых случаях передавать часть нагрузки от докового веса на клетки, что мы здесь не будем обсуждать, поскольку этот вопрос выходит за рамки данной работы и заслуживает отдельного рассмотрения. Отметим, что в работе [4] утверждается, что, с другой стороны, килевая дорожка способна воспринять значительный кренящий момент. Но этот вывод получен без учёта совместной работы килевой дорожки и клеток и в большинстве случаев является ошибочным.

В отечественной практике принято считать, что кренящий момент для судна, стоящего в доке, складывается из момента от смещения относительно ДОУ, ветровой нагрузки на силуэт судна, выступающий из дока, а в плавучем доке — ещё и момента от крена дока. Если предположить, как указано ранее, что в исходном состоянии клетки не несут нагрузки, а лишь касаются судна, то в результате приложения кренящего момента  $M_{кр}$  будут работать клетки одного борта, их суммарная реакция

$$R'_{кл} = \frac{M_{кр}}{y_{кл}},$$

где  $y_{кл}$  — среднее расстояние от центра клеток до центра килевой дорожки.

Количество пар клеток не должно быть меньше частного от деления этой реакции на допускаемую нагрузку на одну клетку, умноженного на коэффициент неравномерности (КН). Согласно [1], этот коэффициент принимается равным: для судов плоскодонных и с небольшой килеватостью — 1,4 при доковом водоизмещении до 5000 т и 1,2 — свыше 5000 т; для судов

с углом килеватости свыше 0,10 — 1,5 при доковом водоизмещении до 3000 т и 1,3 — свыше 3000 т.

Следует отметить, что в американской практике [5], [6] возможность смещения и появления в связи с ним дополнительного кренящего момента не рассматривается. Кренящий момент от ветра определяется применительно к его скорости 100 уз (51,4 м/с). В популярно и подробно составленном руководстве для докмейстера и других специалистов, занятых докованием [6], освещаются, в частности, такие факторы, оказывающие влияние на распределение реакций доковых опор, как неодинаковая высота и жёсткость доковых опор, переменная ширина горизонтального киля, несоответствие абсциссы центра тяжести (ЦТ) опорной поверхности абсциссе ЦТ судна, возможная непрямолинейность килевой линии судна, но нагрузки, обусловленные смещением судна, не упоминаются. Кстати, не предусмотрен также явный учёт неравномерности опорных реакций кильблоков и клеток, хотя, например, в работе [7] уделено внимание роли неопределённых факторов. При этом чрезвычайно важная роль отводится сейсмическим нагрузкам. Предполагается, что они вызывают появление горизонтального ускорения в ЦТ судна, равного 0,2g, и соответствующей силы инерции. Практически именно кренящим моментом от сейсмической нагрузки определяется минимально необходимое количество клеток, хотя вероятность того, что во время стоянки судна в доке произойдёт землетрясение, исчезающе мала, тогда как вероятность расчётного смещения (0,3 м) достаточно велика (согласно выполненным нами измерениям в доках Дальзавода для более чем 400 доковых постановок — 8 %). Представляется сомнительным, что импульсное воздействие при землетрясении (в виде «кинематического возбуждения», т. е. не приложенной нагрузки, а горизонтального перемещения опоры, величина которого вряд ли будет велика) способно вызвать опрокидывание судна, стоящего в доке. Необходимость учёта сейсмических воздействий, особенно для подводных лодок, которые имеют небольшую ширину и высоко расположенный ЦТ, связывается с повышенной сейсмической опасностью районов, в которых эти лодки ремонтируются [8], [9].

При постановке крупнотоннажных судов в сухие (не в плавучие!) доки на несколько дорожек проблемы неравномерности нагрузок на боковые опоры, видимо, не существует, вместо неё возникает проблема оптимальной (рациональной) расстановки доковых опор [10], но в плавучих доках как при одиночных, так и при групповых постановках отмечаются определённые сложности [11].

Попутно отметим, что в американских руководствах предполагается, что клетки двух бортов при отсутствии кренящего момента воспринимают около 15 % от докового веса судна, хотя меры по начальной разгрузке клеток не предусмотрены.

Далее мы не будем учитывать ветровую нагрузку, но укажем следующее. Сравнивать отечественный и зарубежный (американский) подходы к определению ветровой нагрузки довольно затруднительно. В России в площадь парусности включаются только проекции поверхностей судна, выходящие за габариты дока, в США по неясной причине полностью учитывается площадь, считая от киля. Расчётное давление ветра по американским правилам составляет 1287 Па при скорости ветра 51,4 м/с, по отечественному руководящему документу [1] для расчёта количества клеток, при скорости ветра 29 м/с, но с добавлением поправочных коэффициентов — 1783 Па; по правилам Регистра [12] при расчёте остойчивости доков — 1300 Па для наиболее тяжёлых климатических условий (7-й географический район). Различны и предельно допустимые давления на клетки, набранные из бруса хвойных пород (2,07 МПа — в США, 1,4 МПа — в России).

От количества клеток и их конструкции, в значительной степени, зависят трудоёмкость и стоимость подготовки (и последующего демонтажа) ДОУ. Перегрузка отдельных клеток может привести к повреждению днища докуемого судна или стпель-палубы плавучего дока. Это позволяет считать актуальной задачу более детального анализа работы клеток в составе ДОУ.

Автору неизвестны отечественные или зарубежные исследования, в которых бы определялись реакции каждой клетки с учётом её индивидуальных характеристик. Методика такого расчёта была разработана нами. Она рассматривает каждую клетку как точечную линейно деформируемую опору и позволяет учитывать отстояние клетки от ДП, высоту её деревянной подушки и угол наклона к горизонту [13] – [15]. Программа позволяет задавать смещения носовой и кормо-

вой оконечностей и получать реакции клеток обоих бортов, их просадки, угол крена судна. Возможны случаи, когда судно из-за смещения не касается некоторых клеток, при этом их реакции получаются нулевыми.

В предлагаемой работе рассматривается только вопрос о реакциях клеток при смещении ДП судна относительно ДП ДОУ. Восстанавливающий момент, создаваемый килевой дорожкой, в случаях, представляющих практический интерес, на два порядка меньше, чем момент от клеток. Далее он не учитывается, поскольку вносимая погрешность несравненно меньше погрешности исходных данных. Моменты, обусловленные ветровой нагрузкой на судно и плавучий док, приводят к изменению реакций клеток, пропорциональному их отстоянию от ДП (при условии равенства коэффициентов жёсткости). Это изменение нетрудно учесть [13] – [15]. Мы не будем обсуждать нормативные смещения и значения ветровой нагрузки. Отметим лишь, что, согласно имеющимся данным, вероятность нормативной ветровой нагрузки значительно меньше, чем вероятность расчётного смещения. Более подробно этот вопрос рассматривается в монографии [15].

### Постановка задачи

Традиционный подход к расчёту клеток заключается в том, что все клетки каждого борта заменяются одной точечной опорой, расстояние которой от ДП равно среднему для клеток одного борта, а коэффициент жёсткости (КЖ) равен сумме КЖ этих клеток. Аналогично точечной опорой заменяется килевая дорожка. Угол наклона клеток к горизонту в этой схеме не фигурирует, а высоты деревянных подушек в итоге определяют общий КЖ.

Мы же будем считать точечной опорой каждую клетку. Будем характеризовать клетку следующими параметрами: площадью, отстоянием от ДП, высотой деревянной подушки и углом наклона к горизонту. Предполагаем, что реакция клетки связана с её просадкой законом Гука; если судно не касается какой-либо клетки, её реакция равна нулю. Отметим, что для более детального анализа клетка может быть разбита, к примеру, на четыре или девять точечных опор. Тогда появится возможность оценить неравномерность нагрузки в пределах одной клетки.

Пусть судно, имеющее некоторую килеватость, смещено на правый борт (ПБ) без крена на величину  $b$ , как показано на рис. 1 жирными сплошными линиями. Пунктиром показано судно без смещения, а стрелками — клетки двух бортов. В исходном состоянии, без нагрузки, клетки не имели бы просадки (стрелки касаются пунктирных линий). Из-за смещения клетка ПБ получит просадку, равную  $b \cdot \tan \beta$ , где  $\beta$  — угол килеватости, а между судном и клеткой левого борта (ЛБ) появится зазор такой же величины.

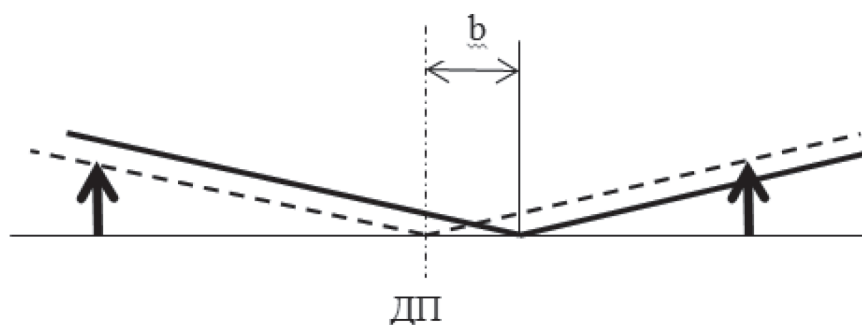


Рис. 1. Смещение судна без крена

Под нагрузкой от докового веса ДОУ в целом получает некоторую просадку, и все клетки при отсутствии смещения будут нагружены пропорционально их КЖ. Тогда смещение без крена вызовет перераспределение реакций: клетки ПБ получат дополнительную нагрузку, а клетки ЛБ разгрузятся на такую же величину. Возникнет момент, по знаку противоположный кренящему (восстанавливающий момент). Под действием этого момента судно получит обратный крен, его центр тяжести (ЦТ) сместится на ЛБ и суммарный кренящий момент уменьшится. Составив урав-

нения просядок (геометрические) и моментов, можно рассчитать реакции всех клеток обоих бортов, на чём мы не останавливаемся, отсылая читателя к [13].

Г. Н. Финкель [1], [3] для судов, имеющих значительную ( $\text{tg}\beta > 0,1$ ) килеватость, при определении необходимого количества клеток принимает этот угол равным  $4^\circ$  (угол крена, допускаемый Правилами Регистра [12, ч. IV, разд. 4.3] для плавучих доков), независимо ни от действительного угла килеватости, ни от расположения и жёсткости клеток. В предлагаемой методике этот угол рассчитывается.

### Примеры расчётов

Рассмотрим некоторые характерные примеры. Но предварительно отметим, что КЖ доковой опоры прямо пропорционален модулю упругости древесины подушки  $E_d$ . Для подушек из бруса хвойных пород, согласно [1], [3],  $E_d = 60$  МПа. Это или близкие значения можно найти в ряде других литературных источников. Но наши массовые натурные измерения [16] дают совершенно иные результаты — 10 – 15 МПа, большее значение характерно для доковых постановок в зимнее время, когда влага внутри брусьев превращается в лёд. Далее будут использоваться наши экспериментальные значения модуля упругости; если же брать нормативные данные, влияние смещения будет намного более опасным. Заметим также, что модуль упругости древесины — понятие достаточно условное, оно используется для упрощения и удобства расчётов. Фактически эта величина крайне изменчива по причинам разброса механических характеристик древесины, нелинейности диаграммы её деформации, ползучести и др.

**Пример 1.** Плоскодонное судно доковым водоизмещением 5000 т и длиной 120 м опирается на 15 кильблоков и 5 пар клеток, размеры всех опор в плане  $1,5 \times 1,5$  м, высота деревянной подушки всех опор 300 мм, модуль упругости принят равным 12 МПа. Отстояния клеток от ДП указаны в таблице. Зависимости реакций клеток (слева — левого борта, справа — правого) от величины смещения на ПБ изображены на рис. 2, здесь же показаны реакции, приходящиеся на один кильблок. Нагрузка, воспринимаемая килевой дорожкой, в этом и двух следующих вариантах не зависит от смещения судна.

### Характеристики клеток

| Номера клеток | 1   | 2    | 3   | 4   | 5     | Кильблоки |
|---------------|-----|------|-----|-----|-------|-----------|
| $y_p$ , м     | 3,0 | 5,0  | 6,0 | 5,0 | 3,0   | 0         |
| $b_p$ , град. | 20  | 2    | 2   | 2   | 20    | 0         |
| $h_p$ , мм    | 300 | 300  | 300 | 300 | 800*  | 300       |
| $x_p$ , м     | 33  | 21,5 | 1   | –17 | –26,5 | 0         |

*Примечание.* Три последние строки относятся к примерам 5, 6 (\*высота для примеров 1 – 4 — 300 мм). Эти данные частично соответствуют примеру из работы [5].

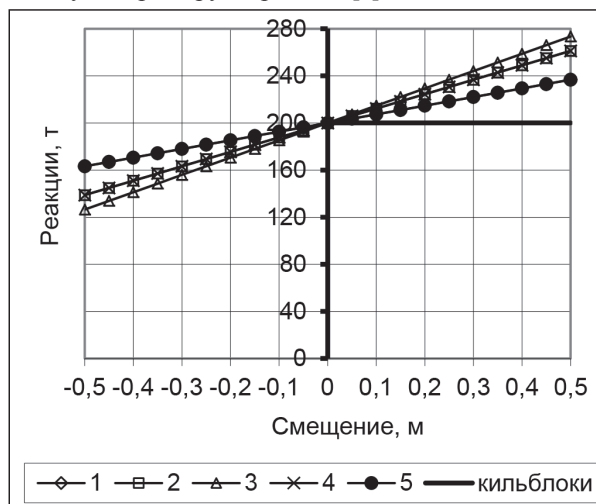


Рис. 2. Изменение реакций клеток плоскодонного судна при смещении. Цифры указывают номера клеток

Расчётное смещение, заложенное в нормативном документе [1], составляет 300 мм. Наши наблюдения в доках показывают, что в отдельных случаях смещения могут достигать 500 – 600 мм. Согласно рис. 2, при смещении 500 мм реакции клеток изменяются на 20 – 40 %, тем сильнее, чем дальше клетка отстоит от ДП. При таком смещении крен судна на правый борт составил 0,00136 рад, или 0,08°. Из-за крена ЦТ судна (при аппликате  $z_g = 7$  м) смещается вправо почти на 10 мм, что приводит к увеличению кренящего момента от смещения на 2 %.

**Пример 2.** Судно с небольшой килеватостью. Основные исходные данные оставляем прежними, но всем клеткам придаём угол наклона к горизонту 0,0126 рад. Изменение реакций клеток при смещении судна показано на рис. 3.

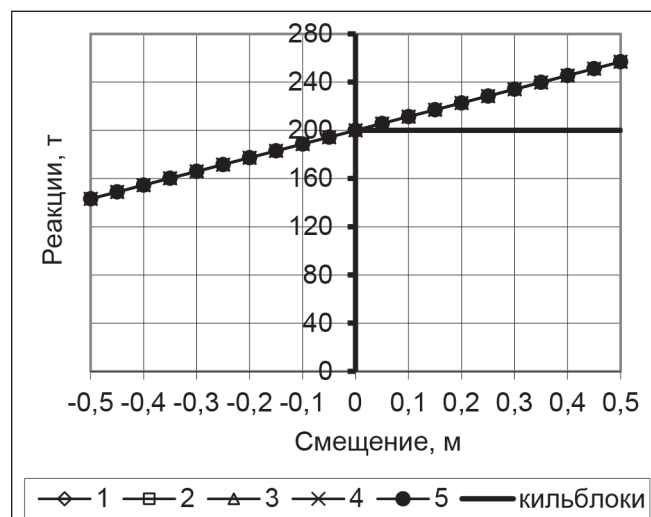


Рис. 3. Изменение реакций клеток судна с малой килеватостью при смещении

Угол килеватости здесь подобран таким, что смещение судна не сопровождается его креном. Поэтому при любом смещении реакции всех клеток одного борта одинаковы.

**Пример 3.** Угол наклона всех клеток к горизонту равен 0,055 рад. Результаты этого расчёта показаны на рис. 4. Этот вариант интересен тем, что при любом смещении реакция наиболее удалённой от ДП клетки № 3 ПБ, ЛБ остаётся постоянной. В отличие от примера 1, здесь быстрее изменяются реакции клеток, расположенных ближе к ДП. Судно получает обратный крен, в результате которого при смещении ДП 500 мм на ПБ ЦТ судна перемещается на 31 мм на ЛБ, что приводит к уменьшению кренящего момента, вызванного смещением, на 6 %.

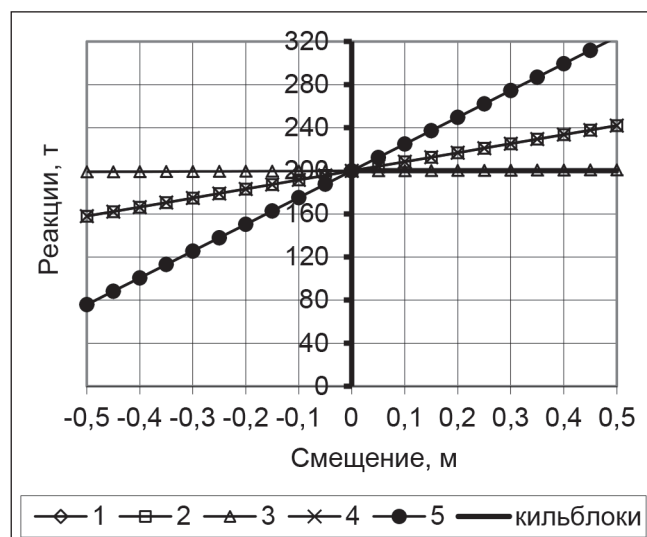


Рис. 4. Изменение реакций клеток судна с килеватостью 0,055 при смещении

**Пример 4.** Судно со значительной, но постоянной килеватостью в районе расположения клеток. Предполагается, что она не повлияла на высоту деревянных подушек клеток, которая осталась равной 300 мм. Основные исходные данные оставляем прежними, но всем клеткам придаём угол наклона к горизонту, при котором  $\text{tg}\beta = 0,20$ . Изменение реакций клеток при смещении судна показано на рис. 5.

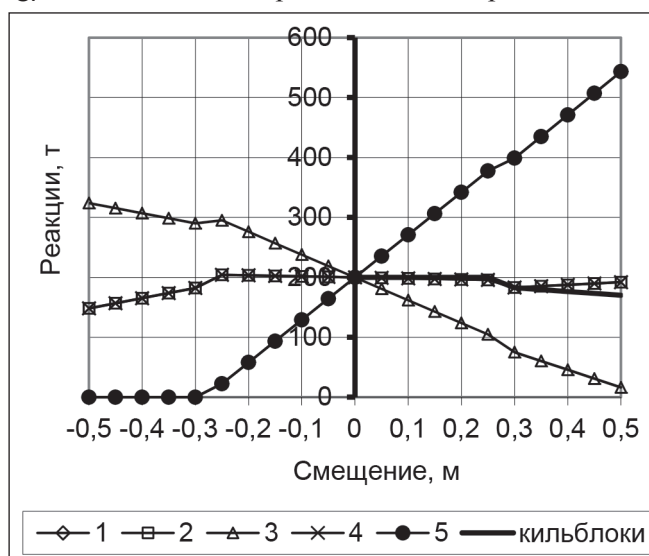


Рис. 5. Изменение реакций клеток килеватого судна при смещении

Как видим, здесь картина реакций сильно изменилась. При смещении более 300 мм клетки № 1 и 5 левого борта перестают работать, тогда как нагрузка на клетку № 5 ЛБ увеличивается примерно в 1,5 раза по сравнению с посадкой судна на ДОУ без смещения. На правом борту ближайшие к ДП клетки № 1 и 5 сильно перегружаются (в два раза при смещении 300 мм), наиболее удалённая клетка № 3 разгружается, нагрузка же на клетки № 2 и 4 изменяется мало. Из-за обратного крена при смещении ДП судна относительно ДП ДОУ 500 мм ЦТ судна смещается на 130 мм на ЛБ, что заметно уменьшает кренящий момент. Характерно, что исключение из работы некоторых клеток сопровождается снижением нагрузки на килевую дорожку. Соответственно растёт общая неравномерность реакций ДОУ.

**Пример 5.** Различные углы уклона клеток (см. таблицу на с. 122), а у клетки № 5 увеличена высота деревянной подушки. Обратим внимание на то, что подобная картина вполне реальна и по величинам углов уклона, и по сочетанию отстояний клеток от ДП, и по возможному увеличению высоты деревянной подушки высоких клеток (или сохранению её неизменной за счёт введения в конструкцию клетки жёстких элементов). В этом примере центры клеток № 1 и 5 на 1 м выше, чем остальных клеток, что, в принципе, требует использования жёстких проставок для уменьшения расхода лесоматериалов. Расчётные реакции клеток изображены на рис. 6.

Этот пример наглядно показывает, насколько неблагоприятным может быть сочетание различных углов уклона клеток и их отстояний от ДП. Уже при смещении судна на ПБ на 75 мм крутые клетки № 1 и 5 ЛБ теряют контакт с днищем. Зато крайние клетки ПБ сильно перегружаются, особенно клетка № 1, имеющая такую же высоту деревянной подушки, что и все остальные (кроме клетки № 5). При максимальном расчётном смещении 500 мм расчётные нагрузки на клетки № 1 и 5 ПБ составили соответственно 1570 и 590 т. Нагрузка на килевую дорожку (на все 15 кильблоков, по размерам таких же, как и клетки!) снизилась с 3160 до 1590 т, практически сравнявшись с нагрузкой на единственную клетку № 1 правого борта. Оценивая эти результаты, не будем забывать, что задача решалась в линейной постановке. При полученном давлении почти в 7 МПа клетка № 1 получит деформацию, близкую к 60 %, а реакция её из-за нелинейности (и неизбежных разрушений) будет значительно меньше. На клетках № 1 и 5 ЛБ, наоборот, будет наблюдаться зазор 150 мм. Судно при смещении 500 мм будет иметь обратный крен 0,00765 рад, в результате которого ЦТ сместится в сторону ЛБ на 54 мм.

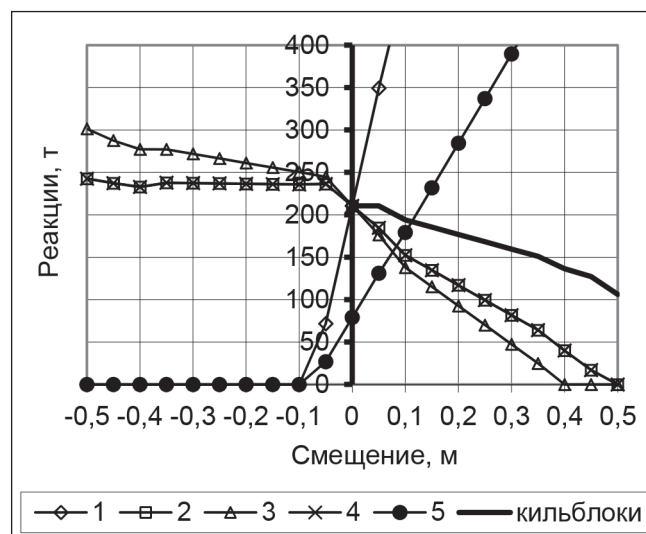


Рис. 6. Изменение реакций клеток судна при смещении

**Пример 6.** Судно с перекосом. Предположим, что корма была точно отцентрована, а сместились в сторону правого борта только носовая оконечность. Для определения реакций клеток необходимо дополнительно задать их абсциссы (указаны в таблице). Углы уклона клеток взяты по примеру 5. Результаты расчётов реакций клеток ПБ и ЛБ (соответственно правая и левая часть диаграммы) в зависимости от смещения судна на носовом перпендикуляре приведены на рис. 7.

Результаты этого расчёта похожи на предыдущие, хотя изменение реакций клеток при одинаковых смещениях меньше. Особенно это заметно для крайней кормовой клетки № 5. Причина вполне объясняется тем, что в пределах района расположения клеток максимальное смещение меньше, чем смещение носовой оконечности, взятое в качестве аргумента при построении диаграммы. Если носовая оконечность смещена на 500 мм, то на клетке № 1 смещение составляет 388 мм, а на клетке № 5 — 140 мм. При этом расчётная реакция клетки № 1 «всего лишь» 1320 т против 1570 т в предыдущем примере. Перемещение ЦТ судна влево вследствие обратного крена получилось равным 24 мм.

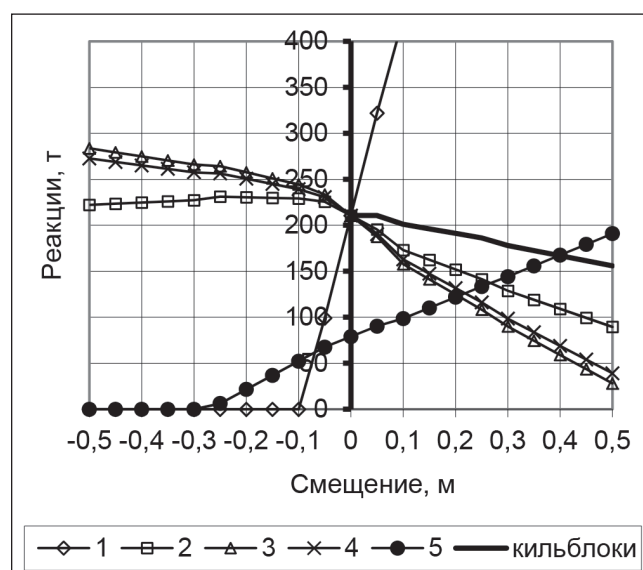


Рис. 7. Изменение реакций клеток судна при смещении

Ряд других примеров имеется в работах [13] – [15].

Нелишне отметить, что во всех этих примерах модуль упругости деревянных подушек считался равным 12 МПа. Если же выполнить подобные расчёты с нормативным его значением 60 МПа, неравномерность реакций возрастёт в несколько раз.

### Заключение

При определении минимально необходимого количества боковых клеток исходят из того, что они должны выдерживать нагрузки, обусловленные, в основном, давлением ветра и возможным смещением судна на тот или иной борт. Величины соответствующих кренящих моментов определяются нормативно [1]. Возможность неодинаковой нагрузки на клетки учитывается введением коэффициента неравномерности, который также назначается. Его нормативные значения не превышают 1,5.

Относительно размещения клеток под днищем судна руководящий документ [1] (помимо того, что они должны быть установлены под достаточно прочными связями судна вне скулового закругления) предлагает устанавливать их на максимальном удалении от ДП, причём опорная поверхность должна быть, по возможности, плоской и иметь уклон не более 20 – 22°. При этом не оговаривается допустимость или недопустимость наличия клеток с различными углами уклона. Не без оснований предполагается, что эти различия во многих случаях неизбежны.

В данной работе показано, что влияние смещения, которое на практике может достигать 400 – 600 мм, может быть намного более неблагоприятным, чем принято считать. Неблагоприятными факторами являются значительная килеватость и неодинаковые отстояния клеток от ДП. Особенно опасно, когда, наряду с пологими, удалёнными от ДП клетками, расположенными в средней части судна, в оконечностях имеются крутые клетки, придвинутые к ДП. Подобные ситуации являются достаточно распространёнными в практике разработки доковых чертежей. Хотя в литературе можно встретить указания на нежелательность крутых клеток, их опасность с точки зрения прочности преуменьшается.

Здесь не учитывались другие неблагоприятные факторы: вероятные отклонения формы как клеток, так и корпуса судна от теоретического обвода днища, разброс механических характеристик деревянных подушек и т. д.

При доковании судов и кораблей с острыми обводами и значительной килеватостью нельзя избежать указанного опасного сочетания неодинаковых отстояний клеток от ДП (хотя бы для обеспечения двух вариантов докового чертежа) и углов уклона. Чтобы исключить опасность повреждений конструкций днища судна или стапель-палубы плавучего дока, следует предусматривать в конструкции крутых клеток, расположенных вблизи ДП (именно они, как показано в статье, при смещениях испытывают наибольшие нагрузки), укладку брусьев подушки с промежутками для уменьшения несущей способности этих клеток. Этого же результата можно добиться использованием сминающихся прокладок. Часто у крутых клеток получается увеличенная высота деревянной подушки, что оказывает благоприятное влияние.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД5-076.011-82. Методические указания. Корпуса кораблей и судов. Методы расчёта прочности. Расчёт на ЭВМ общей и местной прочности кораблей и судов при постановке в сухой и плавучий доки. — Л., 1982. — 237 с.
2. ОН9-964-69. Расчёт и конструирование докового опорного устройства. Расчёт реакций опорного устройства при постановке судов в сухой и плавучий доки. — М., 1969. — 118 с.
3. Козляков В. В. Проектирование доковых опорных устройств / В. В. Козляков, Г. Н. Финкель, И. Я. Хархурим. — Л.: Судостроение, 1973. — 176 с.
4. Нисенбаум С. Л. Влияние реакций кильблоков на устойчивость судна при постановке в док / С. Л. Нисенбаум // Технология судостроения. — 1967. — № 6.
5. Harren P. A. (ed.). Safe Operation and Maintenance of Dry Dock Facilities / P. A. Harren. — Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010. — 223 p.
6. Dockmaster training manual. — USA: Heger Dry Dock, Inc., 2005. — 278 p.

7. *Cheng Y. S.* Optimal and robust design of docking blocks with uncertainty / Y. S. Cheng, F. T. K. Au, L. G. Tham, G. W. Zeng // *Engineering structures*. — 2004. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 499–510. DOI:10.1016/j.engstruct.2003.11.007.
8. *Luchs J. K.* Earthquake resistant submarine drydock block system design: diss. / J. K. Luchs. — Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
9. *Hepburn R. D.* Potential Failure of Surface Ship and Submarine Drydock Blocking systems Due to Seismic Loadings and Recommended Design Improvements / R. D. Hepburn, J. K. Luchs, D. G. Karr // *Society of Naval Architects and Marine Engineers-Transactions*. — 1988. — Vol. 96. — P. 28.
10. *Chen C.* Optimal dock block arrangement considering subsequent ships solved by genetic algorithm / C. Chen, C. K. Huat // *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management (EPPM 2013)*. October 23-25, 2013. — Bangkok, Thailand, 2013. — Pp. 770–783.
11. *Aguirrezabala G.* Multiple vessel dry-docking and other issues related with the operation of a floating dock / G. Aguirrezabala // *International Conference on Drydocks*. — London: Launching & Shiplift, 2003.
12. Правила классификации и постройки морских судов: в 5 т.— СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 580 с.
13. *Антоненко С. В.* Совершенствование расчёта боковых клеток дока / С. В. Антоненко // *Судостроение*. — 1992. — № 1. — С. 33–35.
14. *Антоненко С. В.* Расчёт реакций доковых клеток / С. В. Антоненко, А. Е. Баскакова // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2010. — № 3-1. — С. 22–25.
15. *Антоненко С. В.* Докование судов. Теория и практика / С. В. Антоненко. — Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing (LAP), 2012. — 304 с.
16. *Антоненко С. В.* Результаты исследований прочности, жёсткости и ползучести деревянных подушек кильблоков / С. В. Антоненко // *Судостроение*. — 1991. — № 1. — С. 43–46.

## CALCULATION OF THE SIDE BLOCKS IN CASES OF VESSEL'S DISPLACEMENT IN DRY DOCK

*The work content of preparing the docking blocks (DB) greatly depends on the number and design of side blocks. Especially it refers to docks, equipped with standard keel track. The side blocks are deployed at a maximum distance from center line (CL), and, if possible, near straight lines (horizontal or plane slanted bottom). The number and construction of side blocks must provide the protection against overturning moment, which can influence on the docked ship, with taking into consideration the load irregularity. Russian practice supply us with information that overturning moments in graving dock are made by the transverse displacement of the vessel from DB and wind impacts. In a floating dock, the overturning moment is added due to list the dock under the wind influence. As known in the USA they don't take into consideration the displacement loads, but they take into consideration the possibility of earthquake.*

*The loads irregularity factor is used for side blocks number calculation. This factor assign in according with the regulations. In the paper the side blocks loads are calculated individually with method offered by the author. Unlike the traditional approach, when all blocks on one side are replaced by a single point support, the individual characteristics of each block are taken into account. These characteristics are block's distance from CL, the angle of inclination to the horizon and the height (thickness) of the wood cap. Also the basic values are offset fore and aft and overturning moment of the wind. The method offers to determine the reaction of each block, and also listing angle. It is suggested that the block react according to the Hook's law.*

*We have provided some samples of calculations for a particular vessel with displacement from 0 to 500 mm. We have considered the cases of plate and rise bottoms. We have shown that actual side blocks load irregularity might be significantly bigger than established according to regulations.*

*Keywords: dry dock, dry-dock blocking, side blocks, overturning moments, block loading, irregularity factor.*

## REFERENCES

1. Russian Federation. Guidance document RD 5-076.011-82. Metodicheskie ukazaniya. Korpusa korablej i sudov. Metody raschjota prochnosti. Raschjot na JeVM obshhej i mestnoj prochnosti korablej i sudov pri postanovke v suhoj i plavuchij doki. L., 1982.

2. Russian Federation. ON9-964-69. Raschjot i konstruirovanie dokovogo opornogo ustrojstva. Raschjot reakcij opornogo ustrojstva pri postanovke sudov v suhoj i plavuchij doki. M., 1969.
3. Kozljakov, V. V., G. N. Finkel, and I. Ja. Harhurim. *Proektirovanie dokovyh opornyh ustrojstv*. L.: Sudostroenie, 1973.
4. Nisenbaum, S. L. "Vlijanie reakcij kilblokov na ustojchivost sudna pri postanovke v dok." *Tehnologija sudostroenija* 6 (1967).
5. Harren, P. A., ed. *Safe Operation and Maintenance of Dry Dock Facilities*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010.
6. *Dockmaster training manual*. USA: Heger Dry Dock, Inc., 2005.
7. Cheng, Y. S., F. T. K. Au, L. G. Tham, and G. W. Zeng. "Optimal and robust design of docking blocks with uncertainty." *Engineering structures* 26.4 (2004): 499–510. DOI:10.1016/j.engstruct.2003.11.007.
8. Luchs, J. K. Earthquake resistant submarine drydock block system design. Diss. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
9. Hepburn, R. D., J. K. Luchs, and D. G. Karr. "Potential Failure of Surface Ship and Submarine Drydock Blocking systems Due to Seismic Loadings and Recommended Design Improvements." *Society of Naval Architects and Marine Engineers-Transactions* 96 (1988): 28.
10. Chen, C., and C. K. Huat. "Optimal dock block arrangement considering subsequent ships solved by genetic algorithm." *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Project, and Production Management (EPPM 2013)*. October 23–25, 2013. Bangkok, Thailand, 2013: 770–783.
11. Aguirrezabala, G. "Multiple vessel dry-docking and other issues related with the operation of a floating dock." *International Conference on Drydocks*. London: Launching & Shiplift, 2003.
12. *Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov*. Vol. 1. SPb.: Rossijskij morskoy registr sudohodstva, 2015.
13. Antonenko, S. V. "Sovershenstvovanie raschjota bokovyh kletok doka." *Sudostroenie* 1 (1992): 33–35.
14. Antonenko, S. V., and A. E. Baskakova. "Calculation of responses of dock cribbings." *Marine intellectual technologies* 3-1 (2011): 22–25.
15. Antonenko, S. V. *Dokovanie sudov. Teorija i praktika*. Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing (LAP), 2012.
16. Antonenko, S. V. "Rezultaty issledovanij prochnosti, zhjostkosti i polzuchesti derevjannyh podushek kilblokov." *Sudostroenie* 1 (1991): 43–46.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Антоненко Сергей Владимирович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный  
университет (ДВФУ)»  
antonenko48@rambler.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Antonenko Sergej Vladimirovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Far Eastern Federal University (FEFU)  
antonenko48@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

УДК 629.565.2

**В. А. Кулеш,  
Д. В. Немкин**

### РАЗРАБОТКА НОРМ ИЗНОСА ДЛЯ ПЛАВУЧЕГО ДОКА С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В работе представлен вариант решения проблемы уменьшения затрат на обеспечение эксплуатационной надежности плавучего дока проекта 985. Решение поставленной задачи достигается за счет введения для плавдока эксплуатационных ограничений, таких как максимальная грузоподъемность, длина докуемого судна и глубина погружения. Анализ данных об эксплуатации плавдока за последние три года выявил, что вес судов, подвергаемых докованию, в основном не выходил за рамки введенного ограничения (только четыре судна из двадцати одного имели водоизмещение более 1000 т). Таким образом, предло-

*женное решение не требует существенного изменения производственной программы судоремонтного завода. Для плавдока проекта 985 были выявлены характерные повреждения и особенности конструкции. Представлены преимущества разработанных специальных норм с учетом опыта эксплуатации плавдока и даны рекомендации, касающиеся его дальнейшей эксплуатации. Показаны недостатки и опасность норм, разработанных без оценки допустимых деформаций и прямых расчётов прочности, учитывающих особенности конструкции плавучего дока.*

*Ключевые слова: плавучий док, эксплуатационные ограничения, техническая диагностика, нормы износа, ремонт, повреждение конструкций, метод конечных элементов.*

## Введение

Судоподъёмные сооружения, сухие и плавучие, в Дальневосточном регионе неуклонно устаревают, при этом продолжают сокращаться судоремонтные мощности, что создаёт проблему реализации «Морской доктрины Российской Федерации до 2020 г.». В таких условиях на первый план выходит продление сроков эксплуатации существующих доков. Опыт показывает, что сохранение проектных характеристик старых плавучих доков, в том числе грузоподъёмности, требует огромных капитальных вложений. В то же время снижение проектной грузоподъёмности и другие эксплуатационные ограничения позволяют уменьшить затраты в ряде случаев в несколько раз, не нанося ущерб производственной программе.

**Описание плавдока.** Плавучие доки проекта 985 (разработчик — Клайпедское отделение «Гипрорыбфлота») строились в 80-е гг. XX в. в г. Херсоне под наблюдением Российского морского регистра судоходства (далее — РМРС). На рис. 1 приведен общий вид плавучего дока. Стальной, несамоходный, неавтономный, понтонный (шестипонтонный), самодокующийся двухбашенный плавучий док по проекту предназначен для докования и ремонта судов с максимальным доковым весом до 1500 т. Башни плавучего дока непрерывны по всей длине и соединены с понтонами болтами.

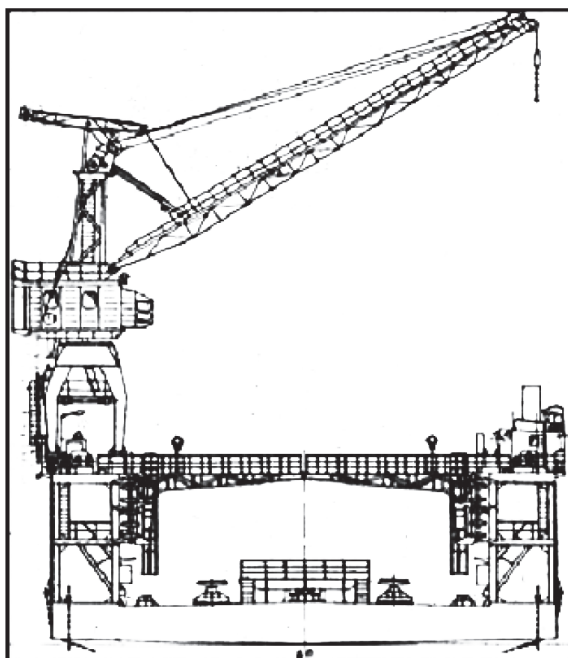


Рис. 1. Общий вид плавучего дока

Все понтоны имеют одинаковые размеры и конструкцию за исключением расположения сухих отсеков. Понтоны отстоят друг от друга на 0,7 м и имеют килеватость днища 0,3 м, а также плоскую погирь стапель-палубы, составляющую у внутреннего борта 0,2 м.

Конструкции дока выполнены по поперечной системе. В понтонах установлены ферменные конструкции на каждой шпации. В башнях также применены ферменные конструкции, установленные через три шпации. Шпация основного набора составляет 0,7 м.

**Опыт эксплуатации.** Выписки из бортового журнала плавдока данной серии ПД-01 (Ливадийский судоремонтный завод) позволили получить и проанализировать данные о докованиях судов за последние три года. Только четыре судна из 21 имели доковый вес более 1000 т, из них лишь одно судно — более 1200 т (рис. 2, а). Сравнительно часто док погружался на глубину 4,6 м от уровня килевой дорожки (глубина погружения 8,6 м), при этом докмейстерский запас в 19 случаях из 21 превышал номинальный докмейстерский запас в 0,5 м (рис. 2, б).

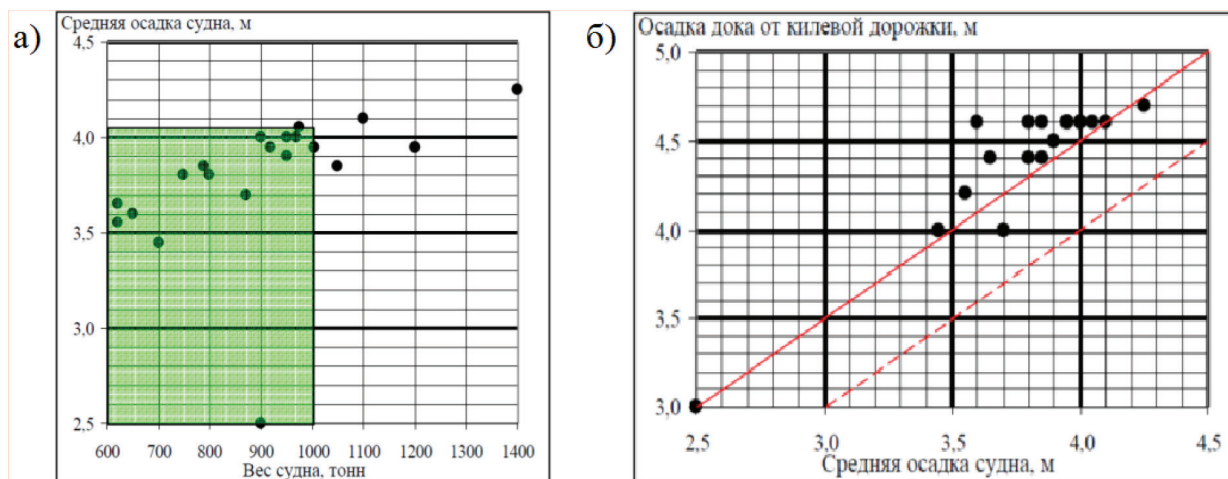


Рис. 2. Данные по докованиям судов:

а — доковый вес поднимаемого судна; б — средняя осадка поднимаемого судна

На рис. 2, а выделена область эксплуатационных ограничений, которые предварительно согласованы с владельцем дока с учётом производственной программы. Ограничения позволяют повысить безопасность работы дока при снижении ремонтных затрат без существенного понижения эффективности.

Характерные повреждения установлены по результатам дефектации и замеров остаточных толщин корпусных конструкций плавдока ПД-01 после 35 лет эксплуатации [1]. Предварительно были выявлены конструкции, требующие безусловного ремонта ввиду сквозной коррозии и потери устойчивости (рис. 3). На рисунке дана схема характерных и наиболее опасных для дока повреждений в виде потери устойчивости элементов ферменных конструкций понтонов. Прежде всего, к ним следует отнести потерю устойчивости стоек диаметральной переборки под килевой дорожкой, а также пиллерсов (показаны слева на рис. 3) и раскосов (показаны справа на рис. 3) ферм. Кроме того, к характерным для многих стальных плавучих доков повреждениям можно также отнести чрезмерную коррозию, вплоть до сквозной, конструктивных элементов в верхней части понтонов (например, плавдок ПД-83, [2]), которая по условиям эксплуатации в течение длительного периода времени находится выше уровня балласта (коррозия в парах морской воды). Коррозия элементов, расположенных ниже уровня балласта и контактирующих с ним, протекает значительно медленнее.

Согласно имеющимся значениям износов, разработанных «Консультант-ДВ» [3], [4] для плавдока этой же серии (ПД-04, пос. Преображение) предварительно были определены участки обшивки плавдока ПД-01, требующие замены. На рис. 4 эти участки выделены зеленым и красным цветом (на примере стапель-палубы).

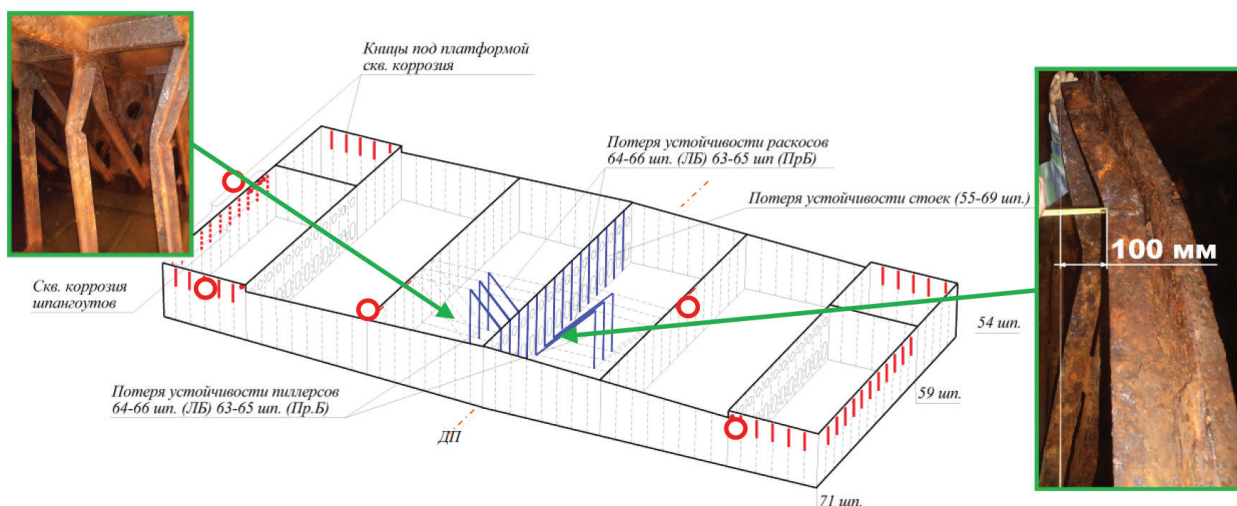


Рис. 3. Схема и фотографии характерных повреждений конструкций четвертого понтона:

- — сквозная коррозия в листах; - - - — сквозная коррозия набора;  
— — сквозная коррозия в кницях; — — потеря устойчивости набора

Согласно нормативам, разработанным авторами документа [5], удалось снизить необходимый объем ремонта стапель-палубы практически в два раза (47 %). На рис. 4 зеленым цветом отмечены участки настила, не требующие обязательной замены, в отличие от нормативов, установленных «Консультант-ДВ».

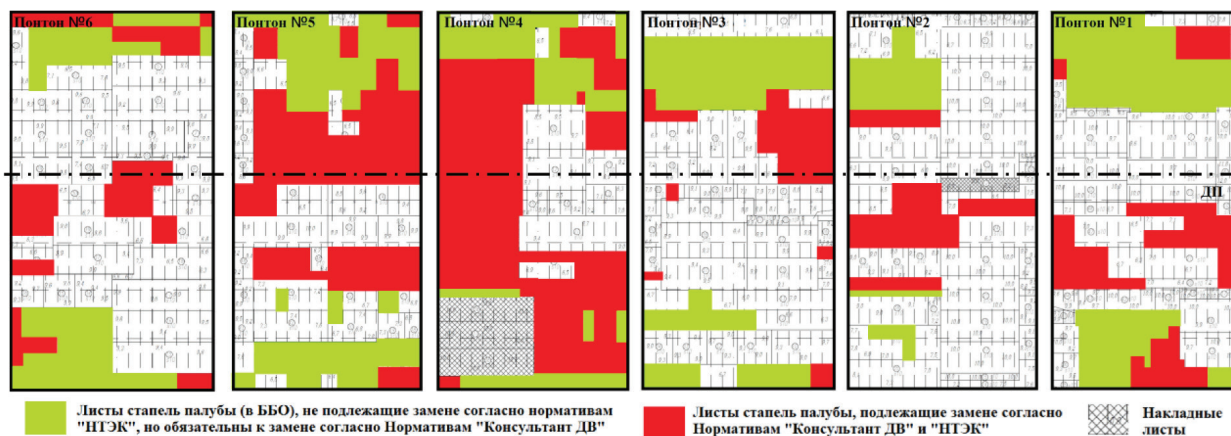


Рис. 4. Схема мест замены настила стапель-палубы дока по различным нормам износа (выделены цветом)

Относительно балок нормативы «Консультант-ДВ» не учитывают 50 %-е ограничение «снизу», регламентируемое РМРС в изданиях [6], [7], поэтому некоторые элементы могут быть изношены практически полностью. Так, износ горизонтальных раскосов, которые играют важную роль в обеспечении местной прочности бортового перекрытия башен, у К-ДВ составляет 90 %. Значения, полученные авторами статьи в процессе разработки норм износа для плавдока с учетом эксплуатационных ограничений, составляют 29 %.

Допустимый износ пиллерсов и раскосов понтонов у К-ДВ составляет 73 % и 69 % соответственно, что также недопустимо, принимая во внимание ограничение «снизу» и особенность конструкции понтонов (отсутствие поперечных связей — флоров).

**Местная прочность.** Расчеты конструкций дока в основе используют нагрузки (напоры), определяемые по диаграмме погружения-всплытия дока (рис. 5). В действующих Правилах РМРС нет прямого указания на использование такой диаграммы. Это в значительной мере затрудняет получение инженерных решений с учетом возможностей эксплуатационных ограничений для доков.

Анализ показал, что принятые проектантом конструктивные решения в целом соответствуют требованиям действующих Правил РМРС. Однако отступления имеются в отношении расстояний между главными поперечными связями понтонов — сплошными флорами (их нет), на что акцентировано особое внимание для разработки требований к техническому состоянию и последующей эксплуатации дока.

Построечные толщины листовых элементов в основном удовлетворяют требованиям Правил РМРС. Отступления более 10 % имеют:

- днище, борта, стапель-палуба — до 17 %;
- стенки балластных отсеков ниже стрингера — до 12 %;
- стенки и переборки сухих отсеков ниже стрингера — до 21 %;
- стенки цистерн ниже стрингера — до 22 %.

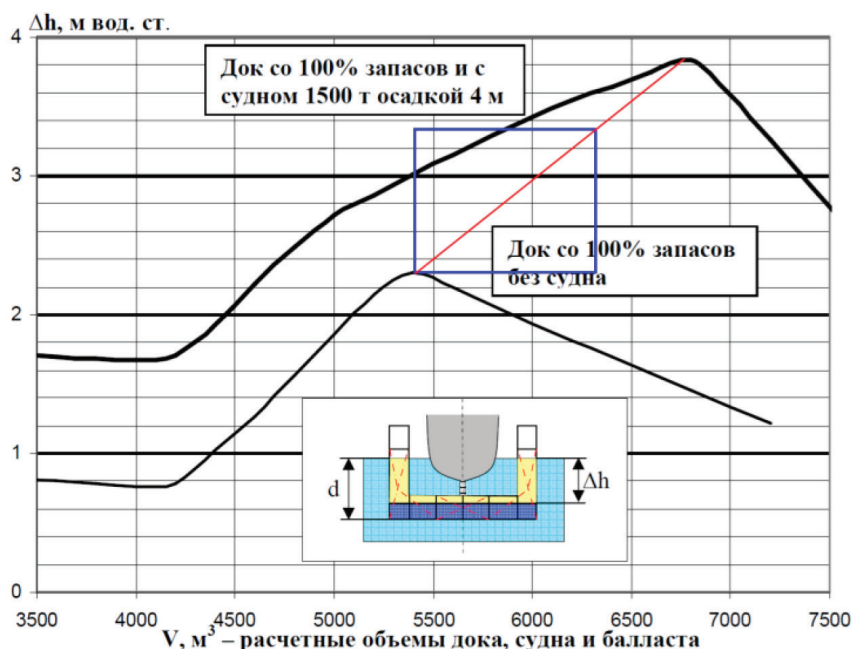


Рис. 5. Зависимости расчетных напоров по диаграмме погружения-всплытия дока

Выявленные отступления учитывались в расчетах прочности, а также при определении допустимых остаточных размеров связей. Расчеты прочности для простых балок набора выполнены по Правилам РМРС, а прямые расчеты прочности ферменных конструкций и перекрытий — методом конечных элементов, без запасов на износ.

В первую очередь, расчеты позволили определить требования к прочностным размерам балок к концу срока эксплуатации. При использовании метода конечных элементов в виде программного комплекса FESTA, рассмотренного в работе [8], конструкции моделировались стержневыми конечными элементами. Напряженно-деформированное состояние было определено на период окончания срока службы путем уменьшения построечных размеров на величину коррозионной надбавки, регламентируемой Правилами РМРС. Во вторую очередь, для оценки проектных запасов прочности рассчитывался вариант с толщинами связей, уменьшенных на величины коррозионных надбавок, при тех же параметрах нагрузок (без ограничений). В последнюю очередь рассчитывался вариант с толщинами связей также уменьшенными на величину коррозионного

износа, но с уменьшением нагрузок за счёт введения эксплуатационных ограничений. На рис. 6 приведены результаты расчетов поперечных рам понтонов.

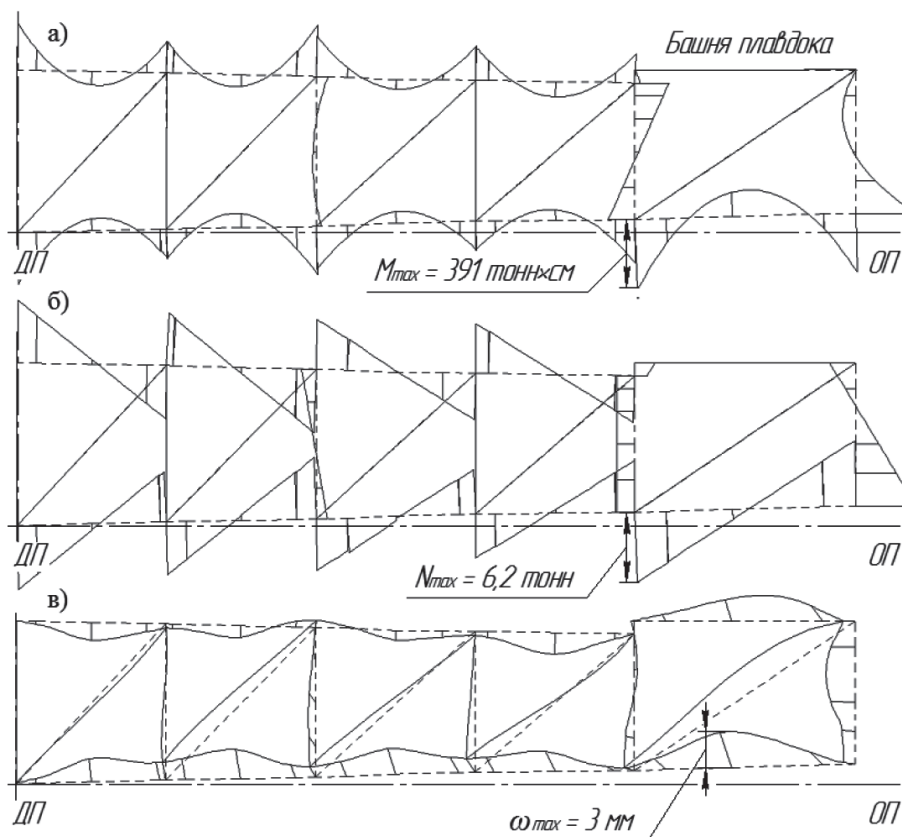


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов (а), перерезывающих сил (б) и перемещений (в)

**Поперечная прочность понтонов.** Специфика конструкции доков данного проекта состоит в том, что формально в качестве главных поперечных связей выступают только концевые переборки понтона. Элементы ферменных флоров (поперечные балки) могут быть включены в расчетное сечение, если они расположены в пределах ширины присоединённых поясков переборок. Роль стоек и раскосов при этом не будет учтена. Выполнение таких расчетов показало, что прочность понтонов и их устойчивость в процессе эксплуатации не обеспечивается. Потому для учета роли ферменных флоров использован приём их замены эквивалентными по длине, жесткости и прочности балками. Результирующее расчетное сечение понтона представлено на рис. 7.

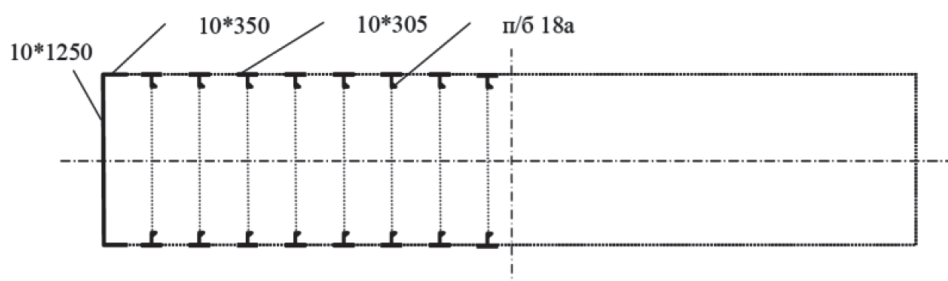


Рис. 7. Схема поперечных связей понтона и их размеры

Результаты расчетов, выполненных на период окончания срока службы при толщинах, уменьшенных на величины коррозионных надбавок по Правилам РМРС, показали наличие связей, теряющих устойчивость. В результате редуцирования и последовательных приближений полу-

чено, что при проектной грузоподъемности, равной 1500 т, прочность понтонов не удовлетворяет требованиям Правил РМРС на период окончания срока эксплуатации. При ограничении грузоподъемности дока до 1000 т характеристики поперечных связей понтонов удовлетворяют Правилам РМРС. При этом сохраняются резервы прочности.

**Продольная прочность башен.** Для понтонного дока на прочность и устойчивость при общем продольном изгибе влияют толщины листов настила топ-палубы, верхних промежуточных палуб, верхних и нижних поясов стенок башен, обшивки днища башен, т. е. конструкций, наиболее удаленных от нейтральной оси поперечного сечения эквивалентного бруса [9].

Расчеты общей продольной прочности дока показали, что стенки башен и палуба безопасности из-за поперечной системы набора могут терять устойчивость даже в начале срока эксплуатации (без износов) при определенных условиях докований. При этом прочность обеспечивается. При уменьшении построечных толщин связей на величину запасов на износ и сохранении наибольших расчетных изгибающих моментов проблема устойчивости связей растёт, и общая продольная прочность дока не обеспечивается. Расчеты при ограничении грузоподъемности дока в 1000 т и соответствующем снижении расчетных изгибающих моментов показали, что момент сопротивления сечений башен дока на период окончания срока службы (без запасов на износ), несмотря на потерю устойчивости сжатых связей, обеспечивает общую продольную прочность дока.

**Допустимые износы и деформации.** Допуски на деформации и остаточные размеры элементов конструкций для возобновления класса РМРС определены в соответствии с «Правилами классификационных освидетельствований судов в эксплуатации» [10] РМРС и с учетом «Инструкции по определению технического состояния и ремонту корпусов стальных плавучих доков» [7]. По результатам расчетов получены допустимые проценты общего и местного износа связей конструкций для оценки технического состояния на класс РМРС с ограничениями, рассмотренными в работе [5].

При последующих освидетельствованиях особое внимание должно уделяться деформациям. Конструкции доков и обычных судов существенно отличаются по условиям нагружения — глобальному (всестороннему) сжатию отсеков без благоприятного фактора распора или самораспора связей. По этой причине нормы деформаций доков существенно жестче (до 10 и более раз) и требуют фиксирования на начальной стадии их появления. Таким образом, при разработке нормативов допускаемых остаточных размеров связей корпуса плавдока необходимо отдельно нормировать допускаемые остаточные деформации для предотвращения аварий.

**Методы ремонта.** С учетом специфики доков рациональные методы их ремонта могут быть существенно расширены, в том числе с использованием накладных полос, а также накладных и дублирующих листов. Большие нормативные сроки службы доков (в 2 раза больше, чем у судов), более редкие освидетельствования и частое накопление значительных объемов ремонтов, которые вынужденно выполняются на плаву, создают веские предпосылки для выбора более «мягких» методов ремонта, чем вырезка и варка конструкций. Методы ремонта путем замены на плаву могут привести к возникновению в конструкциях опасных и технически не контролируемых остаточных сварочных (ремонтных) напряжений, которые для обычных судов снижаются путем релаксации в условиях движения на волнении.

### Заключение

Рассмотренные особенности плавучего дока, а также использование небольших построечных толщин связей и их износ обуславливают актуальность учета проблемы устойчивости связей. Расчёты показали, что требования Правил РМРС к устойчивости стенок башен и концевых переборок понтонов не выполняются и при проверках общей продольной и поперечной прочности плавучего дока в эксплуатации следует применять процедуру редуцирования сжатых изношенных связей.

По результатам расчетов сформулированы эксплуатационные ограничения для конкретного плавдока, а именно: грузоподъемность, длина докуемого судна и максимальная глубина

погружения плавдока. Возможность докования судов, выходящих за указанные ограничения, но с меньшим доковым весом требует в каждом конкретном случае дополнительных расчетных обоснований.

Также авторами в процессе разработки специальных норм [5] были выработаны следующие рекомендации по дальнейшей эксплуатации плавдока проекта 985 (ПД-01, пос. Ливадия).

1. Для повышения долговечности при всплытии дока с грузом рекомендуется не производить откачку балласта из центральных отсеков при глубинах погружения плавдока на миделе, превышающих 6,5 м.

2. Снижать изгибающие моменты за счет перераспределения 500 т дополнительного балласта, образуемого за счет ограничения грузоподъемности с 1500 т до 1000 т.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет № 15.70042.171 о замерах остаточных толщин корпусных конструкций, ДОК-01, РС803699. — Находка: Приморское отделение Российского морского регистра судоходства, 2015. — 1032 с.
2. Кулеш В. А. Экспертиза прочности плавучего дока ПД-83М / В. А. Кулеш, С. В. Каленчук, О. Э. Суворов [и др.] // Вологдинские чтения. — 2008. — № 71. — С. 139–146.
3. Расчет нормативов допускаемых износов. Док №4 (пр. 985) РС854775. 985-101-КДВ.002. — Владивосток: ООО «Консультант ДВ», 2013. — 16 с.
4. Расчет набора корпуса по Правилам РС. Док № 4 (пр. 985) РС854775. 985-101-КДВ.001. — Владивосток: ООО «Консультант ДВ», 2013. — 60 с.
5. Расчетное обоснование допускаемых остаточных размеров связей корпуса плавучего дока «Док-01» с учетом ограничений. № 15-03н/Д01. Согласовано с Главным управлением РМРС. — Владивосток: ООО «Научно-техническая экспертиза и консалтинг», 2015. — 190 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов: в 3 т. — Т. 1. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — 580 с.
7. Инструкции по определению технического состояния и ремонту корпусов стальных плавучих доков, НД № 2-139902-018: сб. нормативно-методических материалов. — Кн. 13. — РМРС. — СПб., 2004. — С. 41–123.
8. Кульцеп А. В. Автоматизированные системы расчетов прочности, устойчивости и колебаний в СМК / А. В. Кульцеп, В. А. Манухин, А. И. Фрумен. — СПб: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. — 123 с.
9. Ле Минь Тху. Постановка задачи проектирования конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к общей прочности / Ле Минь Тху, В. Н. Трякин, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 18–24.
10. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013. — 226 с.

### DEVELOPMENT OF DETERIORATION STANDARDS FOR FLOATING DOCK WITH OPERATIONAL RESTRICTIONS

*This paper presents a solution to the problem to reduce costs at providing the operational reliability of the floating dock project 985. The solution of this problem is achieved by the introduction of operating limitations to the floating dock such as maximum loading capacity, the length of the repaired vessel and the diving depth. Analysis of operation data of floating dock over the last three years showed that the weight of the repaired ships basically does not ventured beyond the limits (only four of the twenty-one vessel had a displacement more than 1000 tons). Thus, the proposed solution does not require significant changes in the production program of the shipyard.*

*For the floating dock of the project 985 typical damages and design features were identified. Paper presents advantages of special norms developed by the authors based on operating experience, recommendations on further exploitation were also gave. The drawbacks and dangers of norms developed without rationing admissible deformations and direct strength calculations, taking into account the structural features the floating dock were also shown in this paper.*

*Keywords: floating dock, operating limitations, technical diagnostics, deterioration standards, repair, damaged structure, finite element method.*

## REFERENCES

1. Otchet № 15.70042.171 o zamerakh ostatochnykh tolshchin korpusnykh konstruktсий, DOK-01, RS803699. Nakhodka: Prmorskoye otdeleniye Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva, 2015.
2. Kulesh, V. A., S. V. Kalenchuk, O. E. Surov, A. I. Mamontov, A. V. Zhitnikov, and A. V. Podgornov. "Ekspertiza prochnosti plavuchego doka PD-83M." *Vologdinskiye chteniya* 71 (2008): 139–146.
3. Raschet nabora korpusa po Pravilam RS. Dok №4 (pr. 985) RS854775. 985-101-KDV.001. Vladivostok: OOO «Konsultant DV», 2013.
4. Raschet normativov dopuskayemykh iznosov. Dok №4 (pr. 985) RS854775. 985-101-KDV.002. Vladivostok: OOO «Konsultant DV», 2013.
5. Raschetnoye obosnovaniye dopuskayemykh ostatochnykh razmerov svyazey korpusa plavuchego doka «Dok-01» s uchetoм ogranicheniy. № 15-03n/D01. Soglasovano Glavnym upravleniyem RMRS. Vladivostok: OOO «Nauchno-tekhnicheskaya ekspertiza i konsalting», 2015.
6. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov v 3-h tomah. T. 1. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2015.
7. Instruksii po opredeleniyu tekhnicheskogo sostoyaniya i remontu korpusov stalnykh plavuchikh dokov, ND № 2-139902-018: sbornik normativno-metodicheskikh materialov. Kn.13, RMRS. SPb., 2004.
8. Kultsep, A. V., V. A. Manukhin, and A. I. Frumen. *Avtomatizirovannyye sistemy raschetov prochnosti, ustoychivosti i kolebaniy v SMK*. SPb.: Izd. tsentr SPbGMTU, 2000.
9. Le Minh Thu, V. N. Tryaskin, and V. N. Lubenko. "Problem definition of hull structures design of a floating dock under the requirements to the general strength." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 18–24.
10. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za sudami v ekspluatatsii. SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2013.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулеш Виктор Анатольевич —  
доктор технических наук, профессор  
Дальневосточный Федеральный Университет  
*Vkulesh@mail.ru*  
Немкин Дмитрий Викторович — аспирант  
Научный руководитель:  
Антоненко Сергей Владимирович —  
доктор технических наук, профессор  
Дальневосточный Федеральный Университет  
*Fefu-pg.nemkin@yandex.ru*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kulesh Viktor Anatolyevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Far Eastern Federal University  
*Vkulesh@mail.ru*  
Nemkin Dmitry Viktorovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Antonenko Sergey Vladimirovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Far Eastern Federal University  
*Fefu-pg.nemkin@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2016 г.

УДК 681.322

В. Д. Чертовской

## О ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДАХ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ ПРИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ

Показана необходимость формирования описания процесса планирования производства при импортозамещении. Для него характерно изменение состава структурных элементов и структурных связей системы планирования. Рассмотрено математическое представление модели функционирования производства, охватывающего бизнес-процесс «Производство», с помощью однородного метода, который базируется на задаче линейного программирования и разностных уравнениях. Метод предложен автором для описания

*процессов планирования и управления трехуровневой системой только для случая изменения структурных связей и обобщен на случай импортозамещения. Предложено математическое описание, которое служит основой для компьютерного моделирования, анализа и оптимизации процессов управления в системе при импортозамещении. Показано, что метод может быть использован для процедуры согласования через целевые функции экономических интересов структурных элементов. Отмечено, что метод может быть применен для исследования динамических и экономических свойств процесса управления производством.*

*Ключевые слова: описание, математическое, линейное программирование, однородный метод, процессы планирования и управления.*

## **Введение**

Планирование выпуска продукции при импортозамещении является актуальной задачей для таких отраслей как судостроение, судоремонт, машиностроение. Оно определяет особенности функционирования производства. В таких условиях эффективным путем повышения качества работы производства является математическое описание процессов планирования и управления производством для последующего формирования интеллектуальных систем управления. Под производством понимается совокупность подсистем технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством при подсистемном представлении или бизнес-процесс «Производство» при процедурном представлении. При импортозамещении ощущается, прежде всего, дефицит времени и потребность в наилучшем использовании имеющихся ресурсов, что достигается путем оперативного перехода на выпуск новой продукции. Изменение цели системы управления в процессе ее функционирования компенсируется изменением структуры системы. Названная специфика определяет использование адаптивного режима с оптимальными алгоритмами планирования и управления.

В процедуре управления в системах выделяются две связанные составляющие: процесс планирования и процесс управления. В плановой экономике процесс планирования является статическим. Задачей в нем является выполнение намеченного плана с использованием управления, иногда — «любой ценой». В таких условиях было сложно вводить новые технологии и продукты в течение интервала действия принятого плана. Статичность планирования послужила одной из причин перехода к рыночной экономике, при этом предполагалось сохранение процесса планирования, ставшего более динамичным. Повышение конкурентоспособности в рыночных условиях требует постоянного введения новых технологий и выпускаемых продуктов. Рыночные отношения привели к появлению нового класса организационно-экономических систем управления — интеллектуальных систем управления (ИСУ) производством.

Компенсация изменения цели функционирования системы осуществляется изменением структуры. Под структурой понимается совокупность элементов и их связей. В ИСУ производством предполагалось изменение структурных связей, поскольку введение или исключение элементов связано со значительными затратами при реконструкции производства. Такой вид управления получил название «гибкое управление». Системный анализ и математическое описание таких систем достаточно подробно рассмотрены в работах [1] – [3], но при импортозамещении недостаточно изменения технологических связей, а требуется оперировать новыми структурными элементами. Системы управления в этом случае являются обобщением ИСУ, что позволяет перенести на системы импортозамещения некоторые результаты, полученные для ИСУ. Изложенное относится, прежде всего, к математическому описанию процессов планирования и управления.

## **Постановка задачи**

Математическому описанию процессов планирования и управления в режиме импортозамещения и посвящена настоящая работа.

При импортозамещении выделяют два варианта: создание нового производства; модернизация имеющегося производства. Первый вариант позволяет вводить прогрессивные технологии

новых самостоятельных производств, но при проектировании требует значительных научно-инженерных затрат, в том числе — времени. Вместе с тем импортозамещение требуется провести в кратчайшие сроки, поэтому будет исследован второй вариант.

Реальное производство при импортозамещении имеет трехуровневую структуру (рис. 1), для которой характерно изменение связей элементов и добавление / удаление структурных элементов, при этом процесс планирования становится динамическим. В литературе широко описываются одноуровневые системы, например [4] – [6]. Из иерархических систем описываются преимущественно двухуровневые системы с очень высоким и малопродуктивным уровнем абстракции [7] или с учетом статики процесса [8]. Известно применение решения одноуровневой задачи оптимального планирования с использованием при декомпозиции двухуровневой структуры [9]. Универсальному описанию многоуровневых систем посвящены работы [10] – [11], отличающиеся использованием разнородных методов для разных уровней, при этом возникает серьезная проблема интеграции методов. К тому же автор [11] одним из направлений развития многоуровневых систем называет формирование однородного метода описания, используемого на всех уровнях.

### Решение задачи

Распространенной структурой организационно-экономических систем является трехуровневая структура (рис. 1), в каждом структурном элементе которой выделяются связанные процессы планирования и управления. При использовании однородного метода описание процессов планирования и управления похоже, поэтому ограничимся описанием процесса планирования.

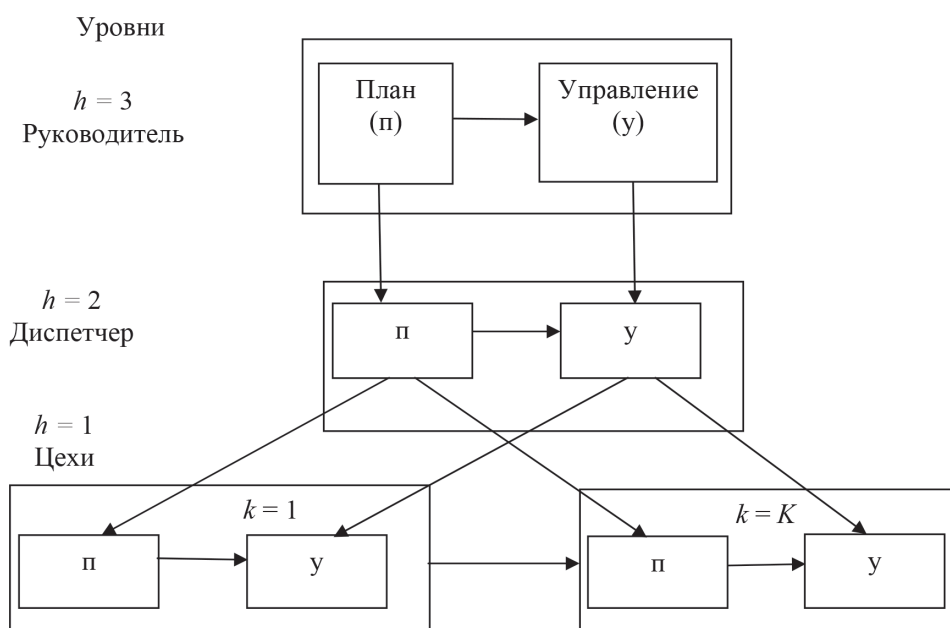


Рис. 1. Трехуровневая структура системы планирования и управления

Работы [1] – [3] посвящены менее универсальной, но в то же время широко распространенной трехуровневой структуре с однородным методом описания всех уровней. Однако в ней рассмотрены изменения только структурных связей (гибкие системы). Расширим это описание на случай появления новых структурных элементов.

Основу однородного метода описания составляет задача статического линейного программирования (СЛП), которая в самом общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned} DP &\leq b; \\ R^- &\leq FP \leq R^+; \\ G(P) = FP &\rightarrow \max, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{R}$  — вектор-столбцы искомого плана (нижнее и верхнее значения), ресурсов, спроса;  $\mathbf{D}$  — матрица норм расходов;  $\mathbf{F}$  — вектор-строка прибыли за единицу готовой продукции;  $G$  — целевая функция.

Описание уровней получит следующий вид.

Уровень  $h = 3$

$$\mathbf{P}(T) \geq \mathbf{R}(T), \mathbf{P}(t_i) = \mathbf{P}(t_{i-1}) + \mathbf{p}(t_i); \quad (2)$$

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t_{i-1}) + \mathbf{B}\mathbf{p}_1(t_{i-1}), \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0; \quad (3)$$

$$\mathbf{p}(t_i) = \mathbf{C}\mathbf{z}(t_i); \quad (4)$$

$$\mathbf{D}\mathbf{p}_1(t_i) \leq \mathbf{b}(t_{i-1}); \quad (5)$$

$$G(\mathbf{P}) = \mathbf{F}\mathbf{P} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{P}$  — незавершенное производство, планы текущий и с накоплением;  $\mathbf{p}_1$  — запуск комплекта материалов в производство;  $\mathbf{R}$  — спрос;  $\mathbf{D}$  — матрица норм расходов;  $\mathbf{b}$  — наличное количество ресурсов;  $\mathbf{F}$  — прибыль от выпуска единицы продукции,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  — матрицы соответствующих размерностей;  $T$ ,  $t_i = iv$  — интервалы времени;  $i = 1, N$ ;  $T = Nv$ .

При этом векторы  $\mathbf{R} = (\mathbf{R}^{(s)T}, \mathbf{R}^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{P} = (\mathbf{P}^{(s)T}, \mathbf{P}^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{p} = (\mathbf{p}^{(s)T}, \mathbf{p}^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{p}_1 = (\mathbf{p}_1^{(s)T}, \mathbf{p}_1^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{z} = (\mathbf{z}^{(s)T}, \mathbf{z}^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{b} = (\mathbf{b}^{(s)T}, \mathbf{b}^{(n)T})^T$ ;  $\mathbf{F} = (\mathbf{F}^{(s)}, \mathbf{F}^{(n)})$ ;  $(s)$ ,  $(n)$  — символы выпускаемой ранее и новой продукции;  $T$  — символ транспонирования. Матрицы  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  имеют структуру вида

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}^{(s)} & \mathbf{D}^{(sn)} \\ \mathbf{D}^{(ns)} & \mathbf{D}^{(n)} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $(sn)$ ,  $(ns)$  — символы связей видов продукции.

Уровень  $h = 1$

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k\mathbf{p}_{1k}(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0}; \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_k(t_i) = \mathbf{C}_k\mathbf{p}_k(t_i); \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{p}_1(t_i) \leq \mathbf{b}^m(0); \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{p}_K(t_i) < \mathbf{P}(T); \quad (11)$$

$$\mathbf{D}_k^\Psi \mathbf{p}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \quad (12)$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^m(t_{i-1}); \quad (13)$$

$$\mathbf{b}_k^\Psi(t_i) = \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \quad (14)$$

$$G_k = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k(T) \rightarrow \max; \quad (15)$$

$$i = 0, N1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где  $\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{p}$  — вектор-столбцы (планового) незавершенного производства и ежедневного плана;  $\mathbf{p}_1$  — вектор-столбец запуска комплектов ресурсов в производство;  $\mathbf{R}$  — вектор-столбец спроса;  $\mathbf{D}$  — матрица норм расходов ресурсов;  $\mathbf{b}$  — вектор-столбец наличного количества ресурсов;  $\mathbf{b}^m(0)$  — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает уровень  $h = 3$ ;  $\Delta \mathbf{b}$  — поступление ресурсов;  $\mathbf{P}$  — вектор-столбец плана уровня  $h = 3$ ;  $\mathbf{F}$  — вектор-строка прибыли от

выпуска единицы продукции;  $\mathbf{A} = (\mathbf{I} + \nu \mathbf{A0})$ ;  $\mathbf{B} = \nu \mathbf{B0}$ ;  $\mathbf{C} = \mathbf{C0}$ ;  $\mathbf{I}$  — единичная матрица;  $\mathbf{A0}$ ,  $\mathbf{B0}$ ,  $\mathbf{C0}$  — матрицы, отражающие динамику процесса планирования;  $t_p$ ,  $T$  — минимальный интервал времени и время моделирования;  $m = 1$ ,  $M$  — виды материальных ресурсов;  $\psi = 1$ ,  $\Psi$  — виды прочих ресурсов;  $i = 1$ ,  $N$  — моменты времени;  $k = 1$ ,  $K$  — номер подразделения. Все векторы и матрицы имеют такой же внешний вид, как и в описании уровня  $h = 2$ .

Уровень  $h = 2$

Выражения (13), (15) заменяются на выражения (16), (17):

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_{1k}(t_i) \leq \mathbf{p}_{1,k-1}^m(t_{i-1}); \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K G_k(t_i) \rightarrow \max. \quad (17)$$

Нетрудно увидеть, что процесс планирования становится динамическим как при подключении новых структурных элементов, так и при изменении вектора  $\mathbf{R}(T)$ . Последнее обстоятельство позволяет описать процессы при переходе на выпуск новой продукции. В результате получено универсальное описание, частный случай которого является описанием процессов в ИСУ.

Действительно, в момент времени  $(t) = (\tau)$  возникает необходимость в оперативном переходе на выпуск новой продукции  $\mathbf{P}_4(\tau) = \{\mathbf{P}_{4j}(\tau), j \in 1, J_4\}$ . При этом старая продукция  $\mathbf{P}_3(\tau)$  из  $\mathbf{P}(\tau)$  снимается с производства полностью ( $\mathbf{P}'_3(\tau) = 0$ ) или частично ( $\mathbf{P}'_3(\tau) < \mathbf{P}_3(\tau)$ ). Тогда возможно использовать прежнее описание при заменах  $(s) = 3$  и  $(n) = 4$ .

Для старой продукции выражение (5) получает вид

$$\mathbf{D}_3 \mathbf{p}_{13}(t_i) \leq \mathbf{b}_3(t_{i-1}). \quad (18)$$

Если при появлении новой продукции новые ресурсы не требуются, описание получает вид

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D}_3 & \mathbf{D}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{13}(t_i) \\ \mathbf{p}_{14}(t_i) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \mathbf{b}_3(t_{i-1}) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Если требуются новые виды ресурсов, выражение (19) трансформируется:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D}_3 & \mathbf{D}_{34} \\ \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{13}(t_i) \\ \mathbf{p}_{14}(t_i) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \mathbf{b}_3(t_{i-1}) \\ \mathbf{b}_4(t_{i-1}) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Заметим, что при  $\mathbf{P}_4 = 0$  получается описание традиционной системы.

Поскольку описание (2) – (17) аналогично описанию ИСУ, можно воспользоваться следующими [1] – [3] ранее полученными результатами:

- методами согласования экономических интересов отдельных структурных элементов и координации динамических свойств элементов;
- алгоритмами генерации числовых данных для оперативной отладки компьютерной модели;
- программами реализации структурных элементов и системы малой размерности с помощью пакета MatLab;
- программами реализации отдельных высокоразмерных элементов.

Возможно будет использовать находящуюся в процессе отладки программу сетевой модели ИСУ производством (рис. 2).

В рамках этой структуры администратор формирует базу данных, используя сгенерированные числовые данные. Первоначально проводится планирование «с нуля». Руководитель формирует план, а на его основе диспетчер и начальники цехов строят планы соответствующих уровней иерархии. Затем задаются параметры для несогласованного плана, и клиенты проводят необходимое согласование. Далее реализуется процедура перехода на выпуск новой продукции сначала без учета динамики планирования, а потом — с учетом инерционности процесса. Рассмотренная модель служит основой для компьютерного моделирования, анализа и оптимизации процессов управления в системе.

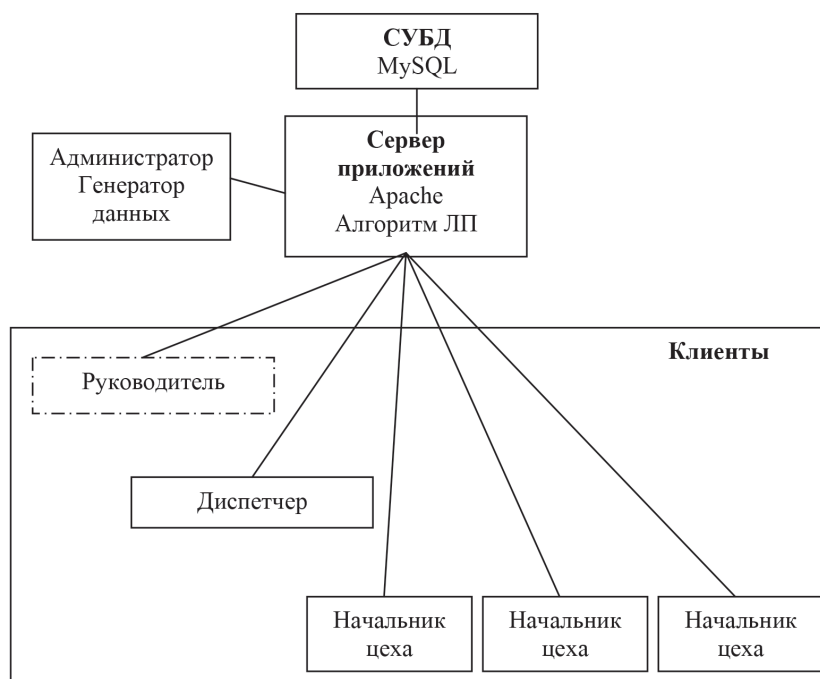


Рис. 2. Схема компьютерной реализации

### Заключение

Потребность формирования математического описания процесса планирования производства при импортозамещении обусловлена необходимостью постоянного повышением конкурентоспособности продукции с помощью интеллектуализации управления.

Рассмотренное математическое представление модели функционирования производства, охватывающего бизнес-процесс «Производство», позволяет сформировать интеллектуальную систему. Для математического описания автором предложено использовать однородный метод, который базируется на задаче динамического линейного программирования и разностных уравнениях. Метод может быть использован для процедуры согласования — через целевые функции — экономических интересов структурных элементов и для исследования статических и экономических свойств процесса управления производством.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертовской В. Д. Интеллектуализация автоматизированного управления производством / В. Д. Чертовской. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. — 164 с.
2. Советов Б. Я. Автоматизированное адаптивное управление производством / Б. Я. Советов, В. Д. Чертовской. — СПб.: Лань, 2003. — 176 с.
3. Советов Б. Я. Адаптивные автоматизированные системы управления производством / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. — 186 с.
4. Альсевич В. В. Оптимизация линейных экономических моделей. Статические задачи / В. В. Альсевич, Р. Габасов, В. С. Глушенков. — Минск: БГУ, 2000. — 210 с.
5. Чертовской В. Д. Реализация задачи динамического линейного программирования при оптимальном планировании судостроительного производства / В. Д. Чертовской // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 78а–88.
6. Чертовской В. Д. Решение задачи динамического программирования при планировании на судостроительном предприятии / В. Д. Чертовской // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 119а–124.
7. Месарович М. Теория иерархических систем: пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

8. Бурков В. Н. Как управлять организациями / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. — М.: Синтег, 2004. — 400 с.
9. Singh Y. P. New multilevel control design for large-scale systems / Y. P. Singh // International Journal of Systems Science. — 1987. — Vol. 18. — Is. 1. — Pp. 83–89. DOI:10.1080/00207728708963950.
10. Новиков Д. А. Математические модели формирования и функционирования команд / Д. А. Новиков. — М.: Физматгиз, 2008. — 248 с.
11. Новиков Д. А. Методология управления / Д. А. Новиков. — М.: Либроком, 2012. — 128 с.

## ABOUT PERSPECTIVE METHODS OF PRODUCT RELEASE PLANNING AT IMPORT REPLACEMENT CONDITION

*Need of submit for planning manufacturing process at import replacement procedure was showed. The character of procedure is changing composition of structure elements and structure relation. Mathematical representation of manufacturing model of business-process "Manufacturing" was considered by homogenous method. It is based on task of linear programming and difference equations. This method was suggested by author to describe planning and control processes of three levels structure only for change of structure relations and was generalized to import replacement case. Mathematical description which is basis for computer modeling, analysis and optimization of system control processes at import replacement was offered.*

*It was showed that method can be used for agreement procedure through goal functions of economic interests of structure elements. It was marked that method can be applied for research of dynamic and economical properties of manufacturing control process.*

*Keywords: description, mathematical, static linear programming, homogenous method, planning process, control process*

## REFERENCES

1. Chertovskoj, V. D. *Intellectualizacija avtomatizirovannogo upravlenija proizvodstvom*. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2007.
2. Sovetov, B. Ja., and V. D. Chertovskoj. *Avtomatizirovannoe adaptivnoe upravlenie proizvodstvom*. SPb.: Lan, 2003.
3. Sovetov, B. Ja., V. V. Cehanovskij, and V. D. Chertovskoj. *Adaptivnye avtomatizirovannye sistemy upravlenija proizvodstvom*. SPb.: SPbGJeTU «LJeTI», 2013.
4. Alseovich, V. V., R. Gabasov, and V. S. Glushenkov. *Optimizacija linejnyh jekonomicheskikh modelej. Staticheskie zadachi*. Mn.: BGU, 2000.
5. Chertovskoj, V. D. "Realization of dynamic linear programming task by optimal manufacturing planning." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3 (2011): 78a–88.
6. Chertovskoj, V. D. "Solving of the problem of dynamic programming when planning at the shipbuilding enterprise." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 3 (2012): 119a–124.
7. Mesarovich, M., D. Mako, and Ja. Takahara. *Teorija ierarhicheskikh sistem*. M.: Mir, 1973.
8. Burkov, V. N., and D. A. Novikov. *Kak upravljat organizacijami*. M.: Sinteg, 2004.
9. Singh, Y. P. "New multilevel control design for large-scale systems." *International Journal of Systems Science* 18.1 (1987): 83–89. DOI:10.1080/00207728708963950.
10. Novikov, D. A. *Matematicheskie modeli formirovanija i funkcionirovanija komand*. M.: Fizmatgiz, 2008.
11. Novikov, D. A. *Metodologija upravlenija*. M.: Librokom, 2012.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чертовской Владимир Дмитриевич —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
vdchertows@mail.ru, kaf\_vsi@gumrf.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chertovskoj Vladimir Dmitrievich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
vdchertows@mail.ru kaf\_vsi@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 марта 2016 г.

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК: 620.92

О. К. Безюков,  
В. Л. Ерофеев,  
А. С. Пряхин

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХЛАДОПОТЕНЦИАЛА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ, РАБОТАЮЩИМИ НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

*В статье оцениваются возможности уменьшения загрязнений с судов, использующих в качестве моторного топлива сжиженный природный газ (СПГ), снижение эмиссии парниковых газов. Предложены пути превращения диоксида углерода в твердую фазу — сухой лёд — за счет использования холодопотенциала криогенного топлива. Рассмотрены перспективы использования на судах СПГ в качестве моторного топлива. Произведена оценка величины холодопотенциала СПГ в системе его топливоподготовки. Определены потребности в «холоде» для получения из продуктов сгорания СПГ диоксида углерода в твердой фазе — сухого льда. Предложен ряд технологических схем получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ. Эти инновации могут улучшать показатели энергетической эффективности судов не только за счет снижения количества расходуемого топлива (и, следовательно, уменьшения выбросов CO<sub>2</sub>), но и за счет превращения диоксида углерода в сухой лёд, что оказывается экономически эффективным.*

*Ключевые слова: криогенный холодопотенциал, сжиженный природный газ, сухой лёд, регазификация, десублимация, парниковые газы.*

### Введение

Использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве судового моторного топлива имеет существенные перспективы не только экономические (разная стоимость СПГ и нефтяных топлив), но и экологические — за счет уменьшения выбросов диоксида углерода CO<sub>2</sub>, окислов азота NO<sub>x</sub> и серы SO<sub>x</sub>. В качестве предупреждения для всей морской индустрии звучит предложение организации «Oxfam» и «Зеленой группы» Всемирного фонда дикой природы на сессии в Дурбане о взывании налога в 25 долл. за тонну судового топлива на основе нефти. Использование СПГ позволит выполнить не только строгие экологические нормативы по выбросам, введенные в действие с 2015 г. для зон контроля выбросов [1] (Emission Control Areas-Eca), а также введенные в действие с 2012 г. режимы контроля выбросов с морских судов вдоль района побережья США и требования по обязательному переходу по всему миру на использование мазута с низким содержанием серы (LSHFO) — с максимальной долей серы не выше 0,5 %, но и иные, не менее строгие нормативы.

Согласно данным выполненным MECIntelligence исследований, если сегодня в мире на газовом топливе работает около 100 судов мирового торгового флота, то к 2020 г. их количество может увеличиться до 10 000 судов. Нарастает тенденция строительства судов с двухтопливными двигателями, позволяющими работу как на нефтяном топливе, так и на газовом. Так, сегодня почти три четверти заказанных судов для транспортировки СПГ строятся с двухтопливными двигателями [2] — [5]. В Норвегии успешно эксплуатируются 25 судов на природном газе. В Бельгии планируется строительство терминалов для хранения СПГ в качестве судового топлива [6]. Таким образом, развитие мирового судостроения в направлении использования СПГ в качестве судового топлива является очевидным. При использовании СПГ в качестве судового топлива требуется найти ряд новых технических решений, связанных, в том числе, с системами бункеровки, хранения и топливоподготовки.

Российский морской регистр судоходства констатировал величину общих выбросов от международного судоходства в 2007 г. равную 2,7 % мировых выбросов. Прогнозируемое увеличе-

ние среднего количества выбросов к 2050 г. возрастет минимально в три раза, а максимально — в 5,4 раза по сравнению с показателями 2007 г.

Рабочий орган Международной морской организации, являющейся специализированным учреждением ООН, Комитет по защите морской среды (МЕРС), выступил с инициативой разработки инструмента по защите атмосферы от парниковых газов. Международная конвенция по предотвращению загрязнений с судов (MARPOL 73/78) в гл. 4 Приложения VI к MARPOL [1] установила требования, направленные на снижение эмиссии парниковых газов, которые в соответствии с Резолюцией ИМО МЕРС.203(62) [7] вступили в силу с 1 января 2013 г. Установлен также показатель энергетической эффективности, оценивающий количество выбросов  $\text{CO}_2$  в расчете на единицу произведенной продукции ( $\text{т CO}_2/(\text{т}\cdot\text{км})$ ).

Далее рассмотрим возможности еще одного способа снижения количества выбросов  $\text{CO}_2$  за счет извлечения диоксида углерода из отработавших газов, перевода его в твердую фазу — сухой лед, хранения, а также его последующего использования.

**Хладопотенциал СПГ.** Система подготовки топлива СПГ к сжиганию в судовых двигателях требует его регазификации и подогрева за счет подвода теплоты. Предложения использовать систему регазификации СПГ для получения твердого диоксида углерода уже высказывались ранее нами и другими авторами [8], [9]. Способом достижения цели — снижения выбросов  $\text{CO}_2$  — является использование эксергии «холода СПГ» как своеобразного вторичного энергетического ресурса (ВЭР-хол), имеющегося у СПГ при хранении на судне (хладопотенциала СПГ). Сопоставление температурных параметров по поверхности теплообмена любых теплообменных аппаратов систем охлаждения отработавших газов, содержащих  $\text{CO}_2$  в газовой фазе, и системы подготовки природного газа к подаче в двигатель (от криогенного состояния до температуры окружающей среды) показывает возможности осуществления ряда схем получения сухого льда — твердой фазы  $\text{CO}_2$  (рис. 1). При этом возможно рассмотрение следующих предложений.

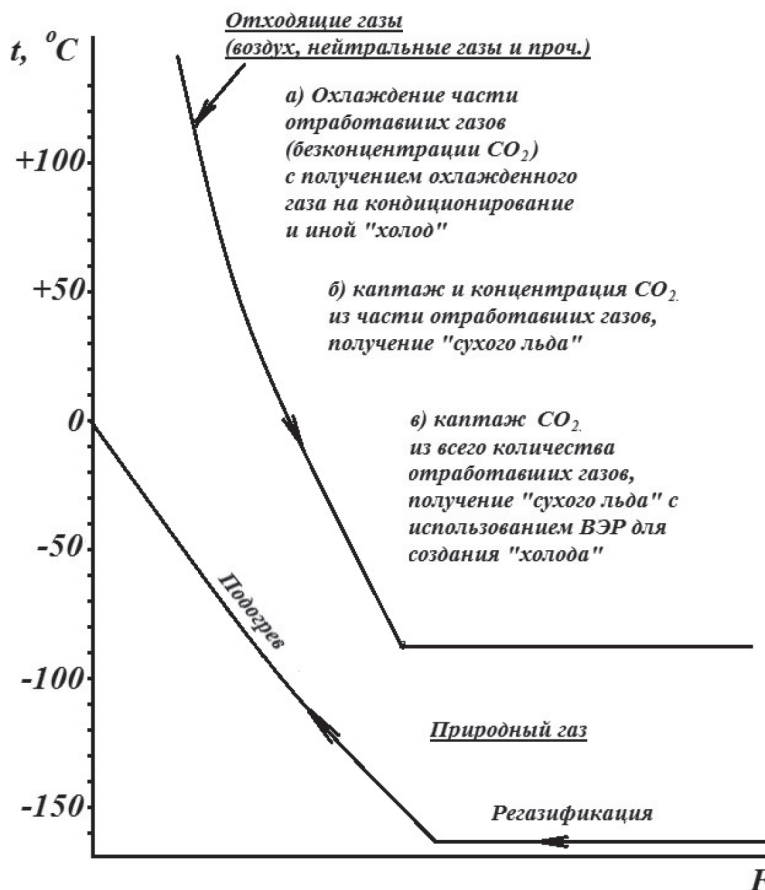


Рис. 1. Изменение температур в элементах систем топливоподготовки СПГ и системах получения сухого льда

1. Охлаждение части отработавших газов — продуктов сгорания СПГ без концентрации диоксида углерода для получения его твердой фазы — сухого льда.

2. Извлечение (каптаж) из продуктов сгорания природного газа большего количества  $\text{CO}_2$  путем его концентрации и последующего получения его твердой фазы.

3. Извлечение из продуктов сгорания природного газа всего количества диоксида углерода, концентрации его и последующего получения сухого льда с привлечением (в случае необходимости) дополнительного «холода» за счет использования ВЭР двигателя в абсорбционной холодильной установке.

Для выбора конкретной схемы следует сопоставить «возможности холода» при криогенном состоянии СПГ в системе топливоподготовки с «потребностями в холоде» для производства различного количества твердой фазы  $\text{CO}_2$  — сухого льда, а в случае необходимости определить дополнительные возможности производства «холода», используя ВЭР двигателя. Под «возможностями холода» СПГ, которым бункеруется судно, будем понимать количество теплоты (и ее температурные характеристики), которое необходимо подвести к природному газу в системе топливоподготовки от хранения топлива до его подачи в двигатель. Поскольку природный газ более чем на 95 % состоит из метана ( $\text{CH}_4$ ), то свойства СПГ будем рассматривать как свойства метана. СПГ может поступать и храниться на судне при криогенных параметрах [10] – [14]: температуре  $t_{\text{хр}} \approx -162^\circ\text{C}$ , плотности  $\rho = 0,415 \text{ кг/л}$  (дизельное топливо —  $0,86 \text{ кг/л}$ ), а иногда — при давлении примерно 0,6 МПа и соответствующей температуре кипения. В зависимости от условий ввода природного газа в газодизель система топливоподготовки должна предусматривать следующие величины давлений газа:

- в случае внешнего смесеобразования — 0,2 ... 0,4 МПа;
- при внутреннем смесеобразовании — 20 ... 25 МПа;
- для четырехтактных газодизелей требуемое давление газа не превышает 1,0 МПа [4], [7].

Количество теплоты, необходимой для подвода к СПГ с целью его регазификации и подогрева до температуры ввода газа в газодизель в расчете на 1 кг метана (СПГ), вычисляется по формуле

$$|q| = i_i - i'_i, \quad (1)$$

где  $i'_i$  — энтальпия жидкого метана при температуре и давлении хранения в криогенной емкости;  $i_i$  — энтальпия перегретого пара (газовой фазы) — метана, подаваемого в газодизель при соответствующем давлении.

Основываясь на данных [11] – [14], можно установить, что для подготовки СПГ к сжиганию в тепловом двигателе необходимо подведение количества теплоты  $q_{\text{СПГ}} = 750 \dots 800 \text{ кДж/кг}$  СПГ (при давлении газа 0,5 ... 0,6 МПа и соответствующих температурах, причем почти 60 % (59,6 % и т. д.), необходимой для подготовки метана для газодизеля, требуется только для регазификации при криогенных температурах ( $r/|q|$ ). Эта величина и может быть названа хладопотенциал СПГ.

*Способы получения углекислоты и её параметры.* Углекислый газ  $\text{CO}_2$ , в зависимости от температуры и давления, может находиться в газообразной, жидкой и твердой фазах. Диаграмма фазового равновесия  $\text{CO}_2$  представлена на рис. 2.

Линии фазового равновесия делят всю область диаграммы на три части: области твердой, жидкой и газообразной фаз. В тройной точке в динамическом равновесии сосуществуют все три фазы. Переход из газообразной фазы в жидкую называется *конденсацией*, из жидкой в твердую — *затвердеванием*, а из газообразной в твердую — *десублимацией*.

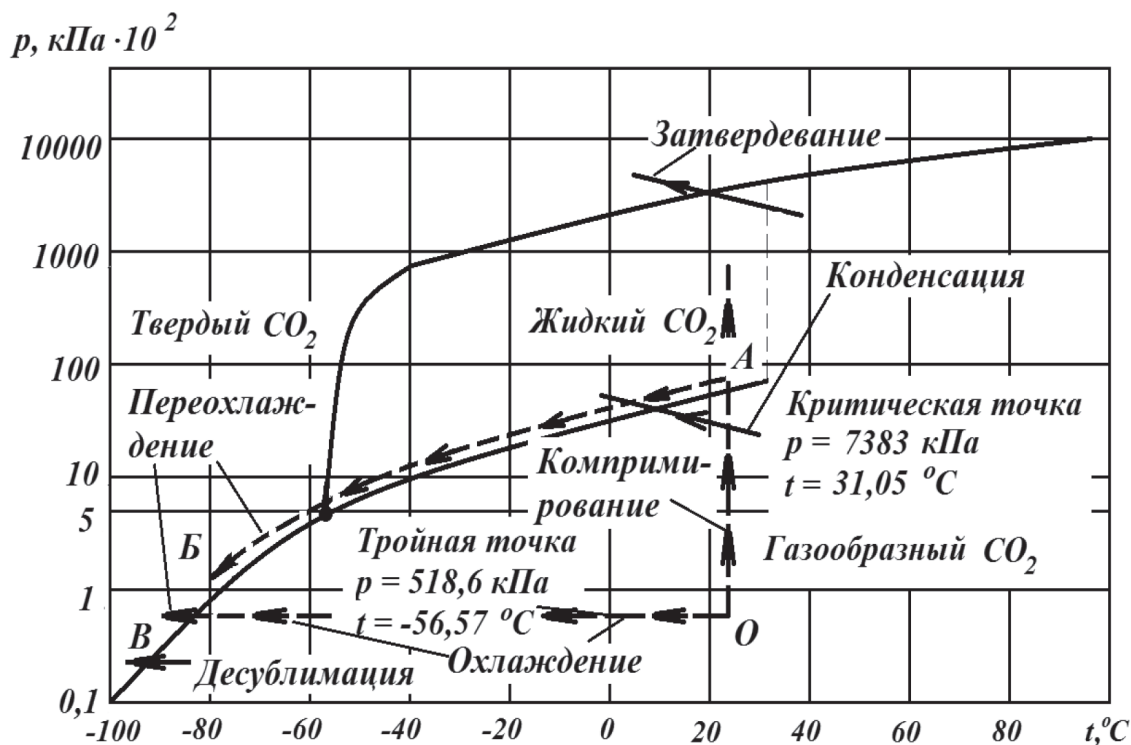


Рис. 2. Диаграмма фазового равновесия  $\text{CO}_2, p = f(t)$

Традиционные схемы получения углекислоты ( $\text{CO}_2$  — жидкость) из продуктов сгорания предусматривают выделение газообразной фазы  $\text{CO}_2$  с последующей ее конденсацией. Точка *A* характеризует традиционные параметры хранения жидкой фазы — углекислоты (например, в баллонах при  $t = 20$  °С,  $p = 5,8 - 6,0$  МПа). В случаях получения газовой фазы  $\text{CO}_2$  или твердой фазы — сухого льда — углекислоту подвергают дросселированию — значительному снижению давления. Процесс сопровождается дроссель-эффектом — снижением температуры [14]. В ряде случаев сухой лед получают «вымораживанием» в процессе охлаждения воды, сопровождаемым охлаждением газа и десублимацией. Количество теплоты, необходимой для охлаждения газообразного  $\text{CO}_2$  от стандартных физических условий ( $p = 760$  мм рт. ст.,  $t = 20$  °С) до начала сублимации, составит

$$\Delta i = i_{20} - r = 651,2 - 596,5 = 54,7 \text{ кДж/}(\text{кг } \text{CO}_2) \approx 55 \text{ кДж/}(\text{кг } \text{CO}_2),$$

а для производства 1 кг сухого льда необходим отвод 651,2 кДж теплоты (удельная холодопроизводительность — кДж/(кг  $\text{CO}_2$ )). Количество  $\text{CO}_2$  (кг), образовавшегося при сжигании 1 кг топлива, показывает величина безразмерного конверсионного фактора  $C_F$  [1], [2] (для СПГ  $C_F = 2,75$  минимальное по сравнению с другими углеводородными топливами). Таким образом, «потребности в холоде» (в расчете на 1 кг сгоревшего СПГ) для получения сухого льда из продуктов сгорания определится как произведение удельной холодопроизводительности на безразмерный конверсионный фактор  $C_F$  и составит

$$q_{\text{СПГ}} = q_{\text{CO}_2} \cdot C_F = 650 \cdot 2,75 = 1787,5 \text{ кДж/}(\text{кг СПГ}).$$

Совмещенные характеристики процессов регазификации СПГ и подогрева природного газа для подачи его в газодизель и процессов получения сухого льда из газообразного диоксида углерода, представленные на рис. 3, показывают принципиальную возможность использования криогенного потенциала СПГ для получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ.

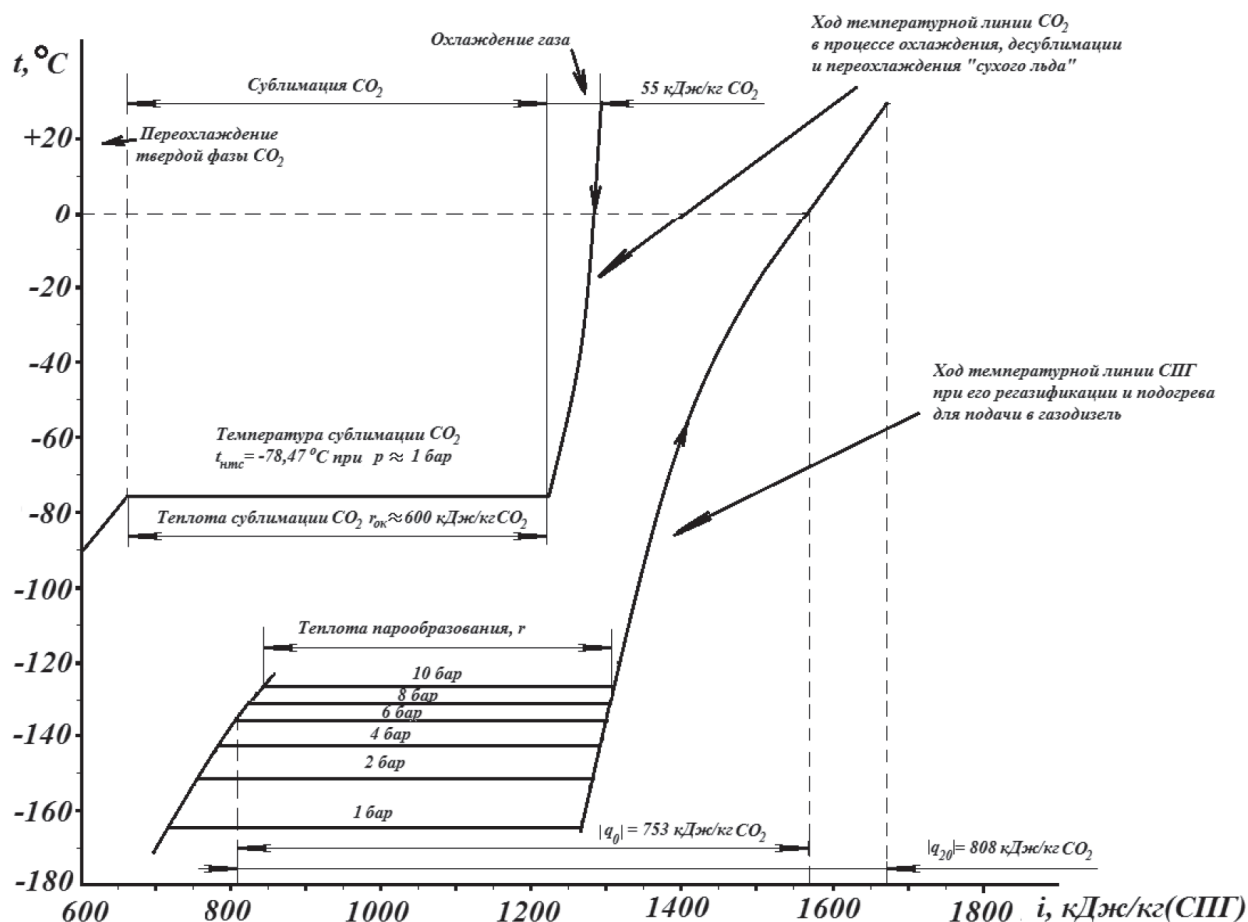


Рис. 3. Характеристики температурного напора в процессах регазификации СПГ и получение сухого льда (линия охлаждения диоксида углерода условно сдвинута по оси энтальпий от начала оси координат)

«Потребность в холоде» для охлаждения продуктов сгорания от температуры  $t_1 \approx 250$  °C (после различных схем использования ВЭР<sub>газ</sub> для когенерации и тригенерации) до температуры десублимации  $\text{CO}_2$   $t_2 = -78,47$  °C рассчитывается по формуле

$$q^{\text{пр.сгор}} = L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p (t_2 - t_1) = (8 \dots 26) \cdot 1 \cdot (250 + 78,47) \approx (2600 \dots 8580) \text{ (кДж/(кг СПГ))}. \quad (2)$$

Величина действительного количества продуктов сгорания 1 кг метана  $L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}}$ , определяемая во многом коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha \approx 1,1$  для котельных установок,  $\alpha \approx 1,8 \dots 2,1$  — для дизельных ДВС и большее значение — для ГТУ), может быть вычислена из соответствующих стехиометрических соотношений.

При организации охлаждения отработавших газов до температуры окружающей среды ( $t \approx 21,5$  °C), например, осуществления «мокрого выхлопа» водой, потребности в «холоде» охлаждением до температуры десублимации существенно снизятся:

$$q^{\text{пр.сгор}} = (8 \dots 26) \cdot 1 \cdot (21,5 + 78,47) \approx (800 \dots 2600) \text{ (кДж/(кг СПГ))}. \quad (3)$$

При этом «потребности в холоде» снижаются не только за счет уменьшения перепада температур, но и за счет поглощения из них паров воды — осушения продуктов сгорания.

Инновационные схемы использования хладопотенциала СПГ для получения сухого льда. Для сопоставления «возможностей» и «потребности в холоде» для получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ составим тепловые балансы для нескольких схем.

Схема 1. Охлаждение части отработавших газов с «вымораживанием»  $\text{CO}_2$ :

$$q_{\text{часть}}^{\text{пр.сгор}} = (L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p \Delta t + r_{\text{CO}_2} L_{\text{CO}_2}) g, \quad (4)$$

где  $q_{\text{часть}}^{\text{пр.сгор}}$  — количество теплоты, необходимой для охлаждения части продуктов сгорания, кДж/(кг СПГ);  $r_{\text{CO}_2}$  — теплота сублимации диоксида углерода, кДж/(кг  $\text{CO}_2$ );  $L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}}$ ,  $L_{\text{CO}_2}$  — действительное количество продуктов сгорания и количество  $\text{CO}_2$  (кг) в расчете на сгорание 1 кг метана, кг/(кг СПГ);  $c_p$  — массовая изобарная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К);  $g$  — массовая доля продуктов сгорания, подвергаемая охлаждению с целью получения сухого льда;  $\Delta t$  — температурный напор между температурой продуктов сгорания и температурой десублимации  $\text{CO}_2$ .

Из последней формулы может быть вычислена доля продуктов сгорания, подвергаемая охлаждению с целью получения сухого льда без использования каких-либо схем концентрации  $\text{CO}_2$  и без охлаждения остальных компонентов продуктов сгорания.

Схема 2. Извлечение (каптаж) и концентрация  $\text{CO}_2$  из части отработавших газов с последующим получением сухого льда:

$$q_{\text{СПГ}} = q_{\text{CO}_2} \cdot C_F \cdot g, \quad (5)$$

где  $q_{\text{СПГ}}$  — «возможности холода» СПГ, кДж/(кг СПГ);  $q_{\text{CO}_2}$  — удельная холодопроизводительность  $\text{CO}_2$ , кДж/(кг  $\text{CO}_2$ );  $C_F$  — безразмерный конверсионный фактор, кг  $\text{CO}_2$ /кг СПГ;  $g$  — массовая доля продуктов сгорания, подвергаемая каптажу.

Схема 3. Извлечение (каптаж) и концентрация  $\text{CO}_2$  из всего количества отработавших газов с последующим получением сухого льда не только за счет хладопотенциала СПГ, но и с привлечением «холода» от ВЭР двигателя в условиях тригенерации. В этом случае тепловой баланс определится как

$$q_{\text{СПГ}} + q_{\text{ВЭР}}^{\text{тригенер}} = C_F q_{\text{CO}_2}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{ВЭР}}^{\text{тригенер}}$  — удельное (на 1 кг СПГ) количество «холода», получаемого за счет использования ВЭР тепловых двигателей в схемах абсорбционных холодильных установок.

Как известно, в реальных процессах «возможности» оказываются меньше, а «потребности» — больше, чем для идеальных процессов. Эти факторы могут быть учтены введением специального коэффициента использования  $\xi = 0,7 \dots 0,9$  (отношение «возможностей» к «потребностям»). Сопоставление потенциала «холода» СПГ (возможности) с потребностями в «холоде» для получения сухого льда показывает нецелесообразность полного извлечения  $\text{CO}_2$  из отработавших газов теплового двигателя судна из-за недостаточности хладопотенциала СПГ. Так, для получения 1 кг твердого  $\text{CO}_2$  (без переохлаждения) необходимо приблизительно 650 кДж «холода», а для получения твердого  $\text{CO}_2$  в количестве 2,75 кг (равное  $C_F$ ) требуется  $q_{\text{CO}_2} = 650 \cdot 2,75 = 1787,5$  кДж «холода», и соотношение «возможностей» и «потребностей» составит

$$\frac{q_{\text{СПГ}}}{q_{\text{CO}_2}} = \frac{750 \dots 800}{1785,7} = 0,4 \dots 0,44, \quad (7)$$

следовательно, «возможности» топливоподготовки СПГ в расчете на 1 кг топлива (СПГ) позволяет десублимировать лишь приблизительно 40 % произведенного при этом диоксида углерода (схема 2). В том случае, если снижение выбросов парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ) менее, чем на 40 % окажется достаточным, то целесообразно использовать схему 1. При этом упрощаются требования к элементам системы, ответственным за отделение  $\text{CO}_2$  из отработавших газов и концентрации  $\text{CO}_2$ . Доля продуктов сгорания, отводимых для «вымораживания», в условиях «мокрого выхлопа» и их осушения составит

$$g = \frac{q_{\text{СПГ}}}{L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p \Delta t + r_{\text{CO}_2} L_{\text{CO}_2}} = \frac{750 \dots 800}{(8 \dots 26) \cdot 1 \cdot 100 + 596,5 \cdot 2,75} = 0,18 \dots 0,33. \quad (8)$$

На рис. 4 представлена принципиальная схема обработки части отработавших газов двигателя внутреннего сгорания с целью извлечения из них диоксида углерода с использованием «холода» СПГ.

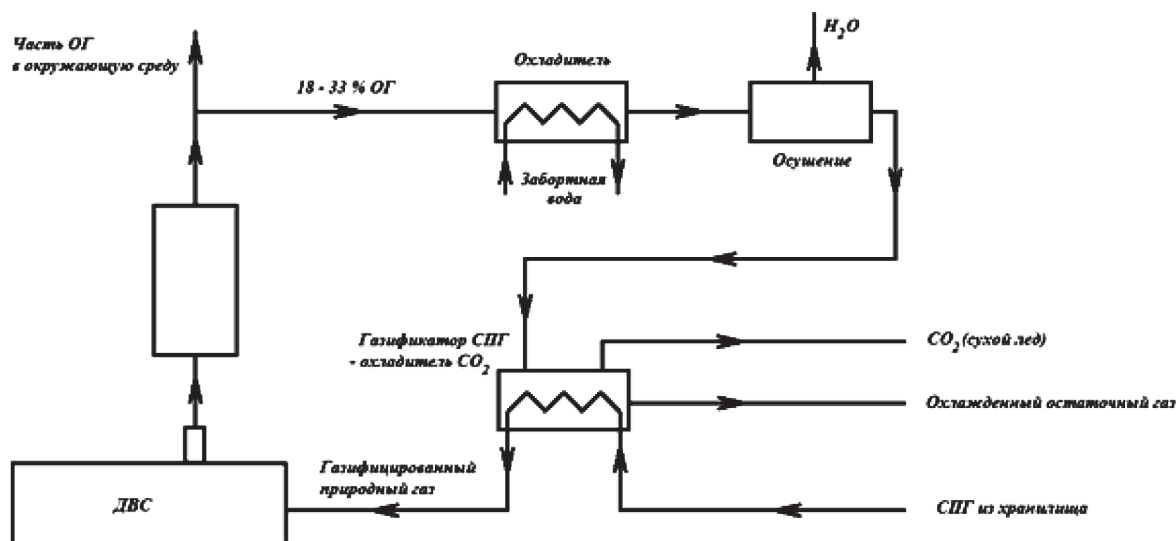


Рис. 4. Схема охлаждения части ОГ двигателя

Часть продуктов сгорания (18 ... 33 %) направляется в теплообменный аппарат, где охлаждается заборной водой, затем газы направляются в осушитель с целью отделения водяных паров. Осушенные продукты сгорания направляются в газификатор, куда одновременно подводится СПГ с целью его подготовки к сжиганию в двигателе. В результате отвода теплоты от продуктов сгорания происходит изменение агрегатного состояния СПГ (газификация) и десублимация CO<sub>2</sub>, в результате которой он переходит в твердую фазу. Оставшиеся охлажденные продукты сгорания, имеющие более низкие значения температур фазовых переходов, направляются на судовые нужды использования холода — кондиционирование, провизионные камеры и проч.

Схема, представленная на рис. 5, позволяет обеспечить извлечение большего количества CO<sub>2</sub> (до 40 %), его каптаж, концентрацию и использование эксергии «холода СПГ» только на получение сухого льда.

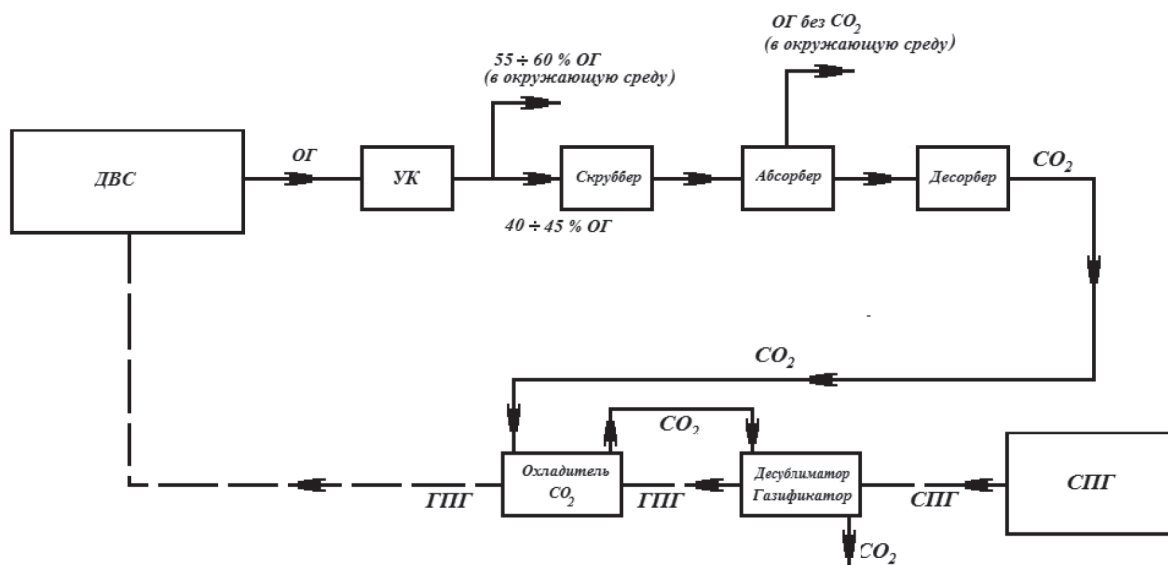


Рис. 5. Схема концентрации CO<sub>2</sub> с последующей десублимацией

Реализация данной схемы обеспечивает использование ВЭР отработавших газов в утилизационном котле (УК) с одновременным снижением их температуры. Дальнейшее охлаждение отработавших газов и их очистка производится в скруббере, откуда газы поступают в абсорбер,

где происходит поглощение  $\text{CO}_2$  абсорбентом. Очищенные от диоксида углерода продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Смесь абсорбента и  $\text{CO}_2$  направляется в десорбер, где происходит ее разделение — диоксид углерода направляется на дальнейшую обработку, а абсорбент возвращается в абсорбер. Диоксид углерода направляется в промежуточный охладитель, где отдает свою теплоту газифицированному СПГ, обеспечивая его подготовку к сжиганию в тепловом двигателе. После охлаждения  $\text{CO}_2$  направляется в десублиматор, где хладопотенциал СПГ используется в процессе перевода углекислоты в твердое состояние.

На рис. 6 представлена схема, дополняющая схему на рис. 5, производством «холода» за счет использования вторичных энергетических ресурсов судового двигателя в утилизационной абсорбционной холодильной установке, что позволяет компенсировать недостатки в «холоде СПГ», используя низкотемпературный (криогенный) потенциал последнего для производства твердого диоксида углерода, обеспечить более полное отделение  $\text{CO}_2$ .

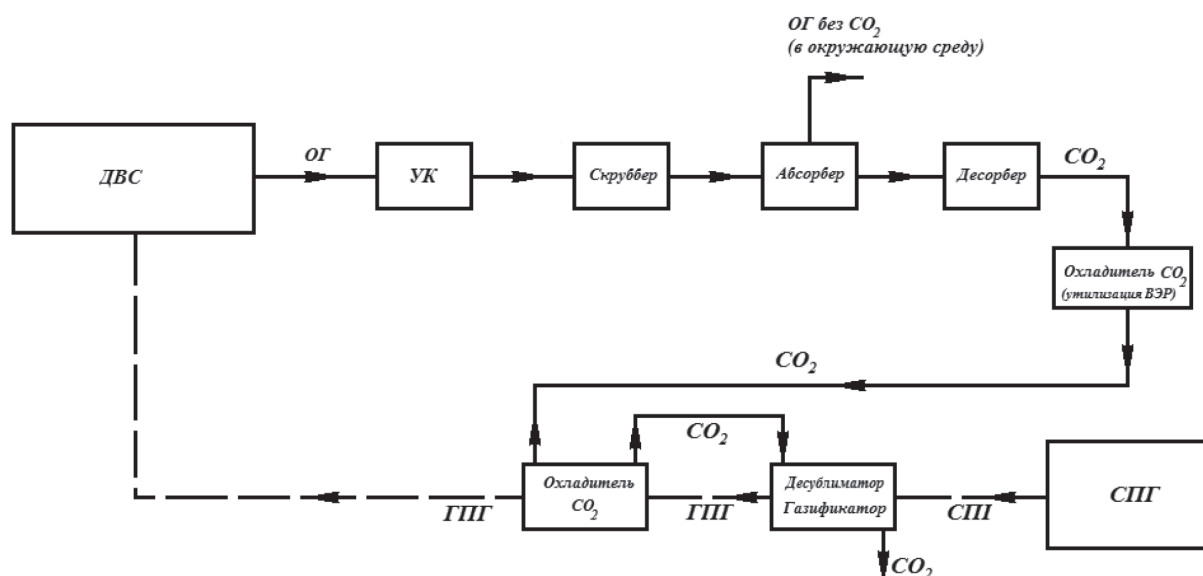


Рис. 6. Технологическая схема концентрации  $\text{CO}_2$  с последующей десублимацией с использованием ВЭР

По сравнению с предыдущей данная схема дополнена охладителем  $\text{CO}_2$ , в качестве которого используется испаритель утилизационной абсорбционной холодильной установки, использующей ВЭР отработавших газов либо ВЭР охлаждающей воды. Это дает возможность значительно понизить температуру диоксида углерода, выходящего из десорбера, и повысить эффективность использования «холода» криогенного теплоносителя — СПГ. Реализация схемы «вымораживания»  $\text{CO}_2$  из отработавших газов представлена на рис. 7.

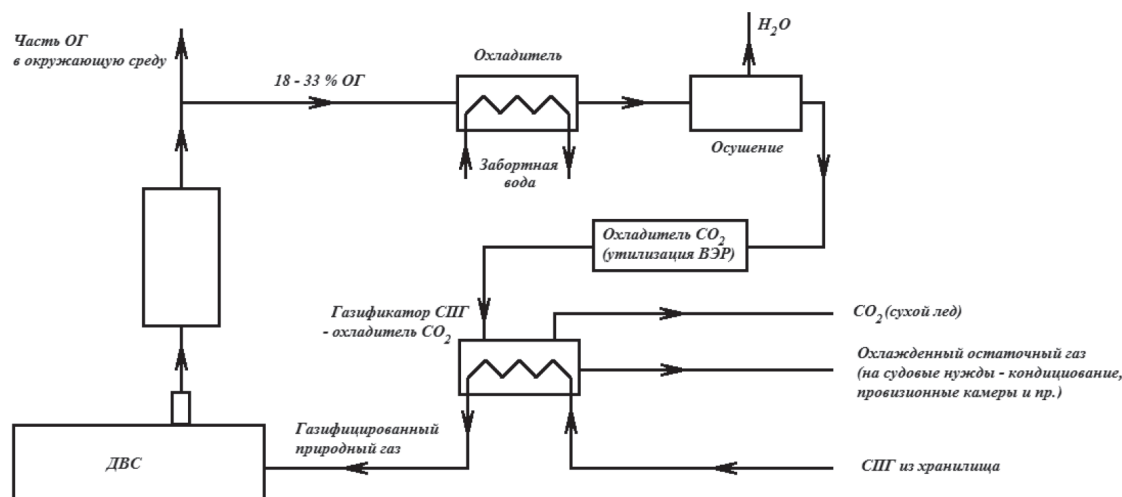


Рис. 7. Технологическая схема с «вымораживанием»  $\text{CO}_2$  с использованием ВЭР

Представленная схема предусматривает многоступенчатое охлаждение отработавших газов:

- в утилизационном котле (использование ВЭР для получения тепловой энергии);
- охлаждение отработавших газов;
- осушение отработавших газов;
- охлаждение отработавших газов с использованием «холода», вырабатываемого абсорбционными холодильными установками, использующими ВЭР теплового двигателя;

– дальнейшее охлаждение с использованием «холода» газифицированного СПГ. На этом этапе одновременно производится подготовка СПГ к сжиганию в двигателе. При этом происходит «вымораживание» (десублимация)  $\text{CO}_2$  из смеси газов (азот, кислород, диоксид углерода и пр.) вследствие различия их физических свойств, поскольку процессы изменения агрегатного состояния остальных компонентов смеси происходят при более низких температурах. Охлажденные газы могут направляться на судовые нужды либо выбрасываться в атмосферу (очищенные от  $\text{CO}_2$ ).

Анализ традиционных способов отделения  $\text{CO}_2$  и получение его твердой фазы показал необходимость использования серьезной компрессорной техники и низкотемпературной холодильной техники, а также устройств по концентрации диоксида углерода. Предлагаемые нами инновационные решения использования криогенного потенциала СПГ позволяет существенно упростить традиционные технологии получения сухого льда.

Технико-экономическая целесообразность предлагаемых инновационных схем. Кроме традиционных возможностей использования сухой лед может быть применен для криобластинга — очистки поверхностей от загрязнений в условиях судоремонта. В случаях длительного пребывания судна в условиях плавания и накопления сухого льда он может быть захоронен в глубине моря. Твердый диоксид углерода имеет плотность  $\rho^{\text{тв}} = 1563 \pm 2 \text{ кг/м}^3$  [11], что примерно в 1,5 раза выше, чем у воды, таким образом, наше предложение позволяет обеспечить его надежное захоронение в случае необходимости.

При непосредственном вымораживании  $\text{CO}_2$  из части отработавших газов «потенциал холода» СПГ исключает необходимость в низкотемпературной холодильной технике и устройствах для концентрации диоксида углерода. Основным принципом оценки технико-экономической целесообразности применения любого из предлагаемых методов снижения выбросов с судов парникового газа  $\text{CO}_2$  является соотношение между «затратами» и «результатами». «Затраты» включают в основном стоимость дополнительного оборудования, позволяющего уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$  и оценить их возможно лишь при конкретном рассмотрении каждого проекта. Они практически единовременны и составляют незначительную добавку к стоимости судна. «Результаты» же проявляются во время всего периода эксплуатации судна.

В данном случае может быть реализована новая концепция взаимоотношений — энергосберегающий перформанс-контракт — превращение будущей экономии энергии в сегодняшние капиталовложения. «Результаты» количественно можно измерить, по крайней мере, по четырем следующим направлениям.

1. Снижение экологического ущерба.
2. Ликвидация «упущенной выгоды», (или снижение штрафных санкций) при допуске в зоны с ужесточенными экологическими требованиями.
3. Снижение эксплуатационных затрат при переходе к работе на более дешевое топливо, например, на сжиженный природный газ.
4. Выручка от продажи готового продукта, получаемого вследствие реализации какого-либо предложения (например, сухого льда — твердой фазы диоксида углерода).

Стоимость снижения экологического ущерба можно оценить по стоимости покупки квоты при превышении ее величины, установленной для судов в соответствии с Киотским протоколом.

Эта величина составляет 2,7 ... 3 евро за 1 т  $\text{CO}_2$  (апрель 2013 г.).

Если оценить ликвидацию «упущенной выгоды» чрезвычайно сложно, то снижение эксплуатационных затрат на топливо можно получить сопоставлением цен на различные нефтяные и альтернативные топлива, например:

мазут 40 — 9300 ... 14000 руб./т;  
 мазуты флотские Ф-5, Ф-12 — 9000 ... 20000 руб./т;  
 мазут флотский, вид А — 7200 руб./т;  
 мазут флотский, вид Г — 7800 руб./т;  
 дизельное топливо — 16600 ... 34500 руб./т;  
 СПГ — 8000 ... 15500 руб./т.

Одним из способов снижения выбросов с судов диоксида углерода  $\text{CO}_2$  является превращение его в твердую фазу — сухой лед — и последующее использование или захоронение.

Цена диоксида углерода высшего сорта зависит от состояния и формы, в которой он находится. Так, путем запроса в организации, реализующие технические газы [15] – [17], углекислота в баллонах намного дороже, чем в изотермических цистернах, цена гранулированного сухого льда (для криобластинга) из-за дефицитности значительно превышает цену на сухой лед в брикетах. В таблице отражены данные результатов запроса.

#### Цены на диоксид углерода в России

| Цена, руб./т | Жидкая углекислота высшего сорта                         |                      | Сухой лёд  |                 |
|--------------|----------------------------------------------------------|----------------------|------------|-----------------|
|              | Низкотемпературная<br>(в цистернах)<br>высокого давления | (в баллонах<br>40 л) | в брикетах | гранулированный |
| Минимальная  | 2080                                                     | 11000                | 20000      | 16000           |
| Максимальная | 7500                                                     | 20000                | 60000      | 100000          |
| Средняя      | 4190                                                     | 16500                | 40000      | 58000           |

Результаты анализа указывают на высокую доходность использования сухого льда.

#### Заключение

1. Использование СПГ в качестве моторного топлива имеет существенные перспективы, причем система подготовки топлива требует его регазификации и подогрева. В зависимости от условий хранения СПГ величина его хладопотенциала составляет 750 – 800 кДж/кг СПГ, при этом около 60 % его приходится на процесс регазификации при криогенной температуре.

2. Строгие экологические нормы энергетической эффективности требуют снижения выбросов парниковых газов, из которых определяющим является диоксид углерода. Одним из способов снижения его выбросов является превращение газообразного вещества в твердую фазу — сухой лёд. Для этого потребуется охладить углекислый газ до начала сублимации и сублимировать его, что составит около 650 кДж/кг  $\text{CO}_2$  при отрицательной температуре.

3. Сопоставление «возможности» хладопотенциала СПГ и потребности в «холоде» для получения сухого льда выявили целесообразность использования своеобразного вторичного энергетического ресурса — хладопотенциала СПГ, что позволило представить несколько вариантов схем получения сухого льда.

4. Исследования позволили определить пределы «возможности» хладопотенциала СПГ для получения сухого льда:

- при охлаждении части продуктов сгорания топлива (18 ... 33 %) без концентрации из них диоксида углерода (каптажа) возможно получить до 0,50 ... 0,90 кг сухого льда на один кг СПГ;

- при включении в схему систем концентрации (каптажа)  $\text{CO}_2$  и его извлечении лишь из 40 ... 44 % отработавших газов возможно получить до 1,1 ... 1,2 кг  $\text{CO}_2$ /кг СПГ;

- для получения большего количества сухого льда к хладопотенциалу СПГ необходимо добавить «холод», получаемый за счет утилизации ВЭР в абсорбционных холодильных установках.

Каждое из предлагаемых инновационных решений улучшает показатели энергетической эффективности судов не только за счет снижения количества расходуемого топлива (и, следовательно, уменьшения выбросов CO<sub>2</sub>), но и за счет превращения диоксида углерода в сухой лед, что оказывается экономически эффективным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. (MARPOL 1973/78) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544> (дата обращения: 24.03.2014).
2. Хасанов И. И. Развитие средств и технологий морского транспорта сжиженных газов: дис. ... канд. техн. наук: 07.00.10 / И. И. Хасанов. — Уфа, 2015. — 160 с.
3. Natgas.info: Liquefied Natural Gas Chain [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.natgas.info/gas-information/what-is-natural-gas/lng> (дата обращения: 20.12.2015).
4. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технологии производства и системы долгосрочного хранения. Газовая промышленность. Серия: Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Использование газа. — М.: [б. и.], 2002. — 63 с.
5. Чепалис И. В. Проблемы устойчивой работы газодизелей при использовании естественно испарившегося груза метановозов в качестве топлива / И. В. Чепалис // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29) — С. 68–75.
6. Бункеровку судов газом в портах Бельгии обеспечит DNV [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://gasin4m.com/post\\_1327496380.html](http://gasin4m.com/post_1327496380.html) (дата обращения: 24.03.2014).
7. Resolution MEPC.203(62). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx> (дата обращения: 10.01.2016).
8. Burel F. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion / F. Burel, R. Taccani, N. Zuliani // Energy. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 412–420. DOI:10.1016/j.energy.2013.05.002.
9. Лавренченко Г. К. Энерготехнологические комплексы на природном газе с когенерационной установкой и тепловым насосом для производства электрической энергии, жидкого диоксида углерода и газообразного азота / Г. К. Лавренченко, А. В. Копытин // Технические газы. — 2005. — № 3 (2005). — С. 15–24.
10. Сжиженный природный газ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sgd.lt/index.php?id=429&L=2> (дата обращения: 21.10.2015).
11. Mokhatab S. Handbook of Liquefied Natural Gas. — 1st Edition / S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, D. A. Wood. — Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014. — 589 p.
12. Дабахов С. И. Развитие производства жидкого диоксида углерода на ОАО «Завод Уралтехгаз» / С. И. Дабахов, Р. М. Завадских, Н. П. Пермяков // Технические газы. — 2007. — № 3 (2007). — С. 60–64.
13. Лавренченко Г. К. Повышение эффективности производства жидкого диоксида углерода / Г. К. Лавренченко, А. В. Копытин // Технические газы. — 2007. — № 4 (2007). — С. 29–36.
14. Загоруйченко В. А. Теплотехнические расчеты процессов транспорта и регазификации природных газов: справ. пособие / В. А. Загоруйченко, Р. Н. Бикчентай, А. В. Вассерман. — М.: Недра, 1980. — 156 с.
15. Прочая промышленная химия [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ru.all.biz/prochaya-promyshlennaya-himiya-bgc516> (дата обращения: 01.08.2015).
16. Углекислый газ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ballgaz.ru/co2.html> (дата обращения: 21.08.2015).
17. КИСЛОРОД СЕРВИС ФАРМ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.o2kirov.ru/tehnicheskie-gazy/uglekislyj-gaz> (дата обращения: 21.08.2015).

## USES OF A HLADOPOTENTIAL OF THE LIQUEFIED NATURAL GAS FOR DECREASE IN EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE HEAT POWER INSTALLATIONS

*In article possibilities of reduction of pollution from the ships using liquefied natural gas (LNG) as motor fuel the, decreasing in emission of greenhouse gases are estimated. Ways of transformation of carbon dioxide in to a firm phase — an artificial ice due to use of a «cold potential» of cryogenic fuel are offered.*

*Prospects of use on vessels LNG as motor fuel are considered, the assessment of size of a «cold potential» of LNG in system of its fuel preparing is made. Needs for “cold” for receiving carbon dioxide LNG from combustion products in a firm phase — an artificial ice are defined. A row of technological schemes of receiving an artificial ice from LNG combustion products was offered. This innovations improve indicators of power efficiency of ships not only due to decrease in amount of the spent fuel is offered (and, therefore, reduction of emissions of CO<sub>2</sub>), but also due to transformation of carbon dioxide into an artificial ice, which is economically effective.*

*Keywords: the cryogenic cold potential, the liquefied natural gas, an artificial ice, regasification, de sublimation, greenhouse gases.*

### REFERENCES

1. Mezhdunarodnaja konvencija po predotvrashheniju zagraznenija s sudov. (MARPOL 1973/78). Web. 24 March 2014 <<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544>>.
2. Hasanov, I. I. Razvitie sredstv i tehnologij morskogo transporta szhizhennyh gazov. Diss. Ufa, 2015.
3. Natgas.info: Liquefied Natural Gas Chain. Web. 20 Dec. 2015 <<http://www.natgas.info/gas-information/what-is-natural-gas/lng>>.
4. Kirillov, N. G. *Szhizhennyj prirodnyj gaz kak universalnoe motornoe toplivo XXI veka: tehnologii proizvodstva i sistemy dolgosrochnogo hranenija. Gazovaja promyshlennost. Serija: Gazifikacija. Prirodnyj gaz v kachestve motornogo topliva. Ispolzovanie gaza*. M.: [b. i.], 2002.
5. Chepalis, I. V. “Problems of stable operation of dual fuel engines by using natural boil-off gas as fuel on lng carriers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 68–75.
6. Bunkerovku sudov gazom v portah Belgii obespechit DNV. Web. 24 March 2014 <[http://gasin4m.com/post\\_1327496380.html](http://gasin4m.com/post_1327496380.html)>.
7. Resolution MEPC.203(62). Web. 10 Jan. 2016 <<http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx>>.
8. Burel, F., R. Taccani, and N. Zuliani. “Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion.” *Energy* 57 (2013): 412–420. DOI:10.1016/j.energy.2013.05.002
9. Lavrenchenko, G. K., and A. V. Kopytin. “The energotechnological plants on natural gas with co-generation plant and thermal pump for manufacture of the electric energy, liquid carbon dioxide and gaseous nitrogen.” *Tekhnicheskie gazy* 3(2005) (2005): 15–24.
10. Szhizhennyj prirodnyj gaz. Web. 21 Oct. 2015 <<http://www.sgd.lt/index.php?id=429&L=2>>.
11. Mokhtab, S., J. Y. Mak, J. V. Valappil, and D. A. Wood. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014.
12. Dabahov, S. I., R. M. Zavadsky, and N. P. Permyakov. “Development of manufacture of liquid carbon dioxide by SCJ «Plant Uraltekhgaz».” *Tekhnicheskie gazy* 3(2007) (2007): 60–64.
13. Lavrenchenko, G. K., and A. V. Kopytin. “Increase of efficiency of liquid carbon dioxide production.” *Tekhnicheskie gazy* 4(2007) (2007): 29–36.
14. Zagorujchenko, V. A., R. N. Bikchentaj, and A. V. Vasserman. *Teplotekhnicheskie raschety processov transporta i regazifikacii prirodnih gazov. Spravochnoe posobie*. M.: Nedra, 1980.
15. Prochaja promyshlennaja himija. Web. 1 Aug. 2015 <<http://www.ru.all.biz/prochaya-promyshlennaya-himiya-bgc516>>.
16. Uglekislyj gaz. Web. 21 Aug. 2015 <<http://ballgaz.ru/co2.html>>.
17. Web. 21 Aug. 2015 <<http://www.o2kirov.ru/tehnicheskie-gazy/uglekislyj-gaz>>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Безюков Олег Константинович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*  
*Ерофеев Валентин Леонидович* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*  
*Пряхин Александр Сергеевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*pralser@yandex.ru*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Bezyukov Oleg Konstantinovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*  
*Erofeyev Valentin Leonidovich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*  
*Pryakhin Alexander Sergeyevich* —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*pralser@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 18 февраля 2016 г.*

**УДК 621.436**

**В. В. Гаврилов,  
В. Ю. Машенко**

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Ввиду наличия весьма значительного числа факторов, влияющих на техническое состояние дизеля, невозможно создать единую диагностическую систему для выявления в достаточном объеме неисправностей, снижающих его топливную экономичность, поэтому в практике эксплуатации дизеля приходится применять набор, как правило, несогласованных между собой средств диагностирования. В статье описан предложенный авторами подход к созданию иерархического комплекса систем диагностирования дизеля, состоящего из общей и ряда локальных систем. Охарактеризована взаимная связь этих систем. Работа общей системы диагностирования основана на использовании результатов анализа индикаторных диаграмм, который позволяет ограничить область последующего поиска неисправности дизеля посредством локальных систем. Разработана локальная система диагностирования топливной аппаратуры, основанная на применении виброакустического метода измерений и результатов анализа виброграмм. Обоснован состав структурных и диагностических параметров для реализации общей и локальной систем диагностирования дизеля. Связь между указанными параметрами установлена в виде диагностических математических моделей, которые в данном случае разработаны с использованием метода малых отклонений. Применение предложенного комплекса систем диагностирования в процессе эксплуатации позволит оценить текущее техническое состояние дизеля и дать его прогноз.*

*Ключевые слова: техническое состояние дизеля, функциональное диагностирование, индикаторная диаграмма, топливная аппаратура, структурные и диагностические параметры, применение виброакустического метода.*

### Введение

Для обеспечения высоких показателей экономичности, надёжности, экологических показателей, низких затрат на эксплуатацию судовых дизелей требуется применение современных диагностических систем. В условиях эксплуатации особенно важно иметь возможность применять функциональное диагностирование, которое позволяет своевременно выявлять наличие и

местоположение дефекта, определять степень работоспособности дизеля и прогнозировать его возможный отказ. С учётом прогноза может быть выбран тот или иной вариант эксплуатации [1]. При этом весьма актуальной является задача количественных оценок технического состояния объекта [2].

Техническое состояние дизеля может быть охарактеризовано большим числом показателей, каждый из которых (а также та или иная их совокупность) может быть задан огромным числом конструктивных и регулировочных параметров (структурных параметров) [3] – [6]. Так, например, при диагностировании только топливной аппаратуры дизеля могут быть использованы до 30 структурных параметров [7]. Для оценки изменения указанных параметров в ходе эксплуатации и, следовательно, для оценки технического состояния требуется применение соответствующей диагностической системы. Очевидно, что для осуществления функционального диагностирования целесообразно применять средства так называемого безразборного определения технического состояния. Решение задачи диагностирования должно быть основано на использовании диагностической модели, устанавливающей связи между структурными и диагностическими параметрами. Указанные связи могут быть выражены математическими или иными формализованными описаниями объекта диагностирования [1]. Ввиду чрезвычайной сложности экспериментальных методов описания этих связей, современный подход к решению задачи состоит в применении математических диагностических моделей [2].

С учётом изложенного авторы сформулировали цель данного этапа исследования, которая состоит, во-первых, в разработке общего подхода к построению системы диагностирования дизеля, позволяющей определить его техническое состояние в условиях влияния на это состояние большого числа структурных параметров, и, во-вторых, в разработке примера реализации указанного подхода.

### **Общий подход к построению системы диагностирования дизеля**

Так как техническое состояние дизеля определяется огромным числом структурных параметров, диагностическая модель может оказаться весьма громоздкой и сложной для использования. Попытка разработки соответствующей математической модели объекта диагностирования не может быть плодотворной ввиду значительных вычислительных погрешностей, вызванных большим числом оцениваемых переменных, поэтому мы предлагаем разработать и применить *иерархический комплекс диагностических систем*, состоящий из общей и ряда локальных диагностических систем. При этом использование общей системы может позволить ограничить область последующего поиска диагностической информации, т. е. выбрать соответствующую локальную систему. В данном случае тот или иной структурный параметр общей системы диагностирования может играть роль диагностического параметра в локальной системе. Предполагается, что возможна разработка многоуровневого иерархического комплекса диагностических систем, в котором «взаимодействие» системы некоторого уровня с системой следующего, более низкого уровня аналогично описанному «взаимодействию» общей и локальной систем.

Допустим, предлагаемый диагностический комплекс предназначен для решения основной задачи — обеспечения требуемой топливной экономичности дизеля, которая зависит преимущественно от эффективности рабочего цикла, оцениваемой индикаторным КПД. Указанный КПД непосредственно зависит от качества внутрицилиндровых процессов, которое может быть отражено в параметрах индикаторной диаграммы. Её параметры в значительной мере зависят от технического состояния двигателя, главным образом — от состояния его топливной аппаратуры (ТА), системы воздухообеспечения, а также гидроплотности рабочего цилиндра, определяемой, в свою очередь, состоянием поршневых колец и клапанов механизма газораспределения. Таким образом, общая диагностическая система должна быть основана на использовании результатов индицирования рабочего процесса дизеля. Локальных систем диагностирования следующего, более низкого уровня может быть три — по числу основных компонентов дизеля: топливная аппаратура, система воздухообеспечения и рабочий цилиндр.

Предлагаемая структура иерархического комплекса позволяет, с одной стороны, сократить время поиска компонента дизеля, содержащего неисправность, а с другой стороны, обеспечить необходимую глубину поиска дефекта за счёт использования той или иной локальной системы диагностирования.

### **Индицирование рабочего процесса как средство реализации общей системы диагностирования дизеля**

Использованию индикаторных диаграмм для оценки технического состояния дизеля посвящены многие современные работы [8] – [12]. Полученные в экспериментах зависимости давления в рабочем цилиндре от времени или угла поворота коленчатого вала (п.к.в.) применяются во многих современных комплексах технической диагностики. Однако при использовании большинства известных комплексов, во-первых, отсутствует возможность локализации неисправностей и, тем более — прогнозирования их развития, во-вторых, не предусмотрена возможность определения по индикаторным диаграммам параметров процесса горения топлива. Очевидно, что эти параметры могут обладать весьма значительной информативностью при решении задач диагностирования.

Состав и число переменных в уравнениях известных диагностических моделях выбирают в зависимости от особенностей метода решения задачи и измерительных возможностей для оценки структурных параметров. Например, авторы [8] разработали метод идентификации технического состояния двигателя, основанный на сопоставлении экспериментально зарегистрированной и расчётной индикаторных диаграмм с математической имитацией неисправностей. При этом в качестве диагностических параметров выбран следующий набор величин: изменение геометрической степени сжатия; изменение массы рабочего тела в цилиндре из-за утечек через неплотности; угол закрытия впускного клапана; параметры характеристики впрыскивания топлива; угол действительного опережения подачи топлива; массовая цикловая подача топлива. На наш взгляд, при построении предлагаемого иерархического диагностического комплекса в общей диагностической системе, основанной на использовании индицирования рабочего процесса, перечисленные величины скорее должны играть роль структурных параметров.

Итак, в нашей работе в качестве результатов индицирования целесообразно использовать собственно индикаторную диаграмму и полученные путём математического анализа диаграммы так называемые характеристики тепловыделения при сгорании топлива [13]. С учётом возможностей указанных средств диагностическими параметрами могут быть приняты параметры индикаторной диаграммы и характеристик тепловыделения:

- $p_c$  — давление рабочего тела в конце процесса сжатия, МПа;
- $p_z$  — максимальное давление рабочего цикла, МПа;
- $\varphi_{\text{сам}}$  — угол самовоспламенения (угол между точкой самовоспламенения горючей смеси и ВМТ поршня на диаграмме, выраженный в градусах п.к.в.;
- $(dx / d\varphi)_{\text{max}}$  — максимальная скорость относительного тепловыделения (или  $(dp / d\varphi)_{\text{max}}$  — «жесткость» процесса сгорания, МПа / °п.к.в.);
- $\varphi_{\text{сгор}}$  — продолжительность сгорания, °п.к.в.

Перечисленные параметры отражены на рис. 1.

Количество выделенных независимых диагностических параметров (в данном случае — пять) определяет максимальное число структурных параметров дизеля, которое может быть включено в диагностическую математическую модель. Диагностическая модель представляет собой систему уравнений. С учётом очевидных требований о равенстве числа неизвестных числу уравнений, количество структурных параметров в данном случае должно быть не более пяти. Из большого числа возможных вариантов выбраны пять наиболее важных параметров, характеризующих техническое состояние указанных элементов дизеля и существенно влияющих на его индикаторный КПД.

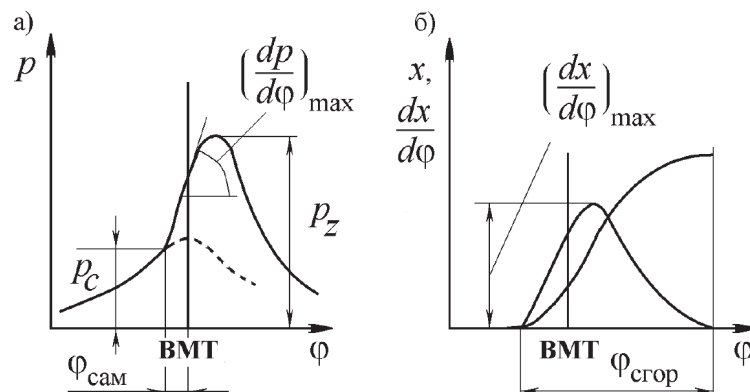


Рис. 1. Диагностические параметры по результатам индицирования рабочего процесса дизеля:  
а — по индикаторной диаграмме; б — по кривым тепловыделения при сгорании топлива

Выбранные структурные параметры должны быть независимыми. Их изменение не должно вызывать разрывов функций диагностических параметров. Последнее требование означает, что с использованием разрабатываемой математической модели будет возможно диагностировать так называемые постепенные отказы [14]. В данном случае в состав структурных параметров могут быть включены:

- $\varphi_{\text{ф}}$  — продолжительность подачи топлива форсункой, °п.к.в.;
- $(\varphi_{\text{сам}} - \varphi_{\text{нпп}})$  — продолжительность периода между самовоспламенением и так называемым геометрическим началом топливоподачи топливным насосом высокого давления (ТНВД), °п.к.в.;
- $p_{\text{к}}$  — давление наддува, МПа;
- $T_{\text{к}}$  — температура наддувочного воздуха, К;
- $\Delta m_{\text{р.т}}$  — суммарная масса утечек рабочего тела из полости цилиндра через зазоры в цилиндро-поршневой группе и клапанах механизма газораспределения, кг.

Заметим, что приведенный перечень параметров является предварительным. Предстоящие исследования позволят оценить уровень информативности предложенных диагностических параметров, а также выявить иные существенные структуроразрушающие факторы и соответствующие структурные параметры.

### Локальная система диагностирования топливной аппаратуры дизеля

В порядке реализации предложенных нами принципов построения иерархического комплекса диагностических систем наряду с описанной общей системой рассмотрим одну из важнейших локальных систем — систему диагностирования топливной аппаратуры дизеля. Прежде всего, необходимо обосновать набор структурных и диагностических параметров. При этом следует учесть, что разрабатываемая локальная система может использоваться как в составе общей системы, так и вне общей системы, т. е. может быть предназначена для оценки технического состояния исключительно ТА. В последнем случае некоторая часть структурных параметров локальной системы может совпадать со структурными параметрами общей системы. Большое число структурных параметров в локальной системе означает лучшие её возможности в выявлении местоположения неисправностей и в прогнозировании отказов.

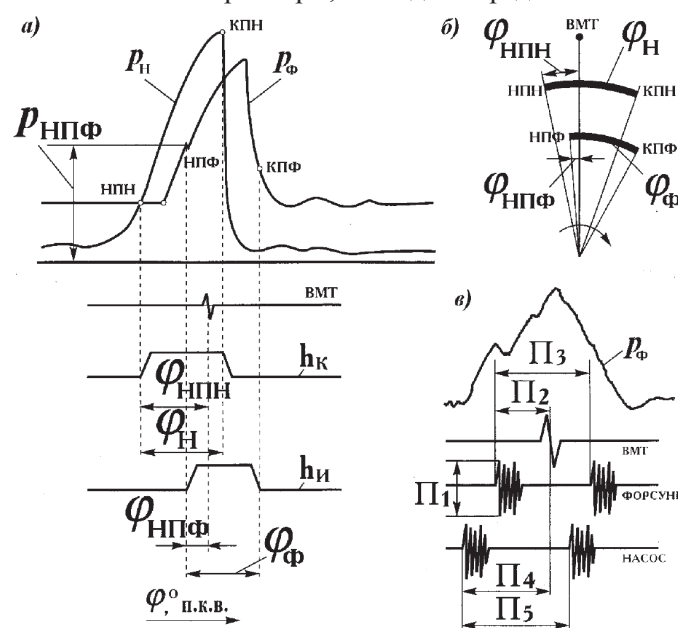
Выбор структурных параметров ТА должен основываться на анализе возможных нарушений в её нормальном функционировании. Перечислим основные нарушения в работе форсунки и топливного насоса высокого давления (ТНВД), которые существенно влияют на эффективность рабочего цикла дизеля и которые могут быть выражены в изменениях соответствующих структурных параметров. К числу отказов форсунки относятся: зависание иглы; поломка пружины; уменьшение жёсткости пружины; закупорка части сопловых отверстий и их износ; износ запирающего конуса; износ прецизионной пары игла – направляющая. К основным отказам ТНВД можно отнести: «прихват» и «заклинивание» плунжера; износ плунжерной пары (плунжера и втулки); появление и развитие

трещин в корпусе насоса; отклонение от заданного геометрического угла начала подачи топлива насосом (вызывающее соответствующее отклонение начала подачи форсункой); возрастание степени неравномерности цикловой подачи по цилиндрам (проявляющееся, в частности, в увеличении межцилиндровой неравномерности продолжительности подачи топлива форсункой); неисправности, вызывающие нежелательный дополнительный подъём иглы форсунки при впрыскивании топлива.

С учётом возможностей предполагаемых средств измерения нами составлен перечень диагностических параметров, контролируя которые можно оценить некоторые структурные параметры, непосредственно отражающие техническое состояние ТА. Диагностические параметры ТА таковы:

- 1)  $p_{\text{нпф}}$  — давление начала подачи топлива форсункой, МПа;
- 2)  $\varphi_{\text{нпф}}$  — угол начала подачи форсункой относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 3)  $\varphi_{\text{ф}}$  — продолжительность подачи топлива форсункой, °п.к.в.;
- 4)  $\varphi_{\text{нпн}}$  — угол фактического начала подачи топлива насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 5)  $\varphi_{\text{н}}$  — продолжительность фактической подачи топлива насосом, °п.к.в.;
- 6)\*  $\varphi_{\text{кпф}}$  — угол окончания подачи форсункой относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 7)\*  $\varphi_{\text{кпн}}$  — угол окончания подачи топлива насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 8)\*  $\Delta\varphi_{\text{нач}}$  — угол запаздывания начала подачи топлива форсункой относительно угла фактического начала подачи насосом (кратко: «запаздывание начала подачи»), °п.к.в.;
- 9)\*  $\Delta\varphi_{\text{оконч}}$  — угол запаздывания окончания подачи топлива форсункой относительно угла окончания подачи насосом (кратко — «запаздывание окончания подачи»), °п.к.в.

В представленном перечне часть диагностических параметров (пп. 1 – 5) можно считать независимыми, а другую часть параметров, помеченных звёздочкой (пп. 6 – 9) — зависимыми, которые могут быть вычислены по известным параметрам 1 – 5. Таким образом, для использования в нашей работе выбраны перечисленные независимые параметры, наглядное представление о которых даёт рис. 2.



|   |                        |                                                  |         |
|---|------------------------|--------------------------------------------------|---------|
| 1 | $p_{\text{нпф}}$       | ДАВЛЕНИЕ НАЧАЛА ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ                 | $\Pi_1$ |
| 2 | $\varphi_{\text{нпф}}$ | УГОЛ НАЧАЛА ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ ОТН. ВМТ            | $\Pi_2$ |
| 3 | $\varphi_{\text{ф}}$   | ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОДАЧИ ФОРСУНКОЙ               | $\Pi_3$ |
| 4 | $\varphi_{\text{нпн}}$ | УГОЛ ФАКТИЧЕСКОГО НАЧАЛА ПОДАЧИ НАСОСОМ ОТН. ВМТ | $\Pi_4$ |
| 5 | $\varphi_{\text{н}}$   | ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОДАЧИ НАСОСОМ                 | $\Pi_5$ |

Рис. 2. Диагностические параметры топливной аппаратуры дизеля:

$a$  — осциллограммы давлений (после ТНВД и перед форсункой), отметки ВМТ, хода клапана ТНВД и иглы форсунки;  $b$  — фазовая диаграмма топливоподачи;  $c$  — виброграммы и соответствующие осциллограммы топливоподачи

Так же, как в описанной общей системе диагностирования, в данном случае количество перечисленных диагностических параметров (пять) должно соответствовать количеству структурных параметров ТА. Для выявления основных из перечисленных выше отказов в состав структурных включены следующие пять параметров:

- 1)  $P_{\text{зат}}$  — сила затяжки пружины форсуночной иглы, Н;
- 2)  $\Phi_{\text{нпп}}$  — угол геометрического начала подачи насосом относительно ВМТ, °п.к.в.;
- 3)  $\Delta_{\text{пп}}$  — зазор в плунжерной паре, мкм;
- 4)  $\Delta_{\text{иф}}$  — зазор в паре игла – направляющая форсунки, мкм;
- 5)  $\mu f_{\text{со}}$  — площадь суммарного эффективного проходного сечения сопловых отверстий форсунки, мм<sup>2</sup>.

Теоретический анализ показывает, что изменение каждого из перечисленных структурных параметров в отдельности, а также совокупное их изменение в любом сочетании вызывает соответствующее изменение выделенных нами диагностических параметров.

Многие из прочих неучтённых в перечне структурных параметров характеризуют внезапные отказы ТА, выявление которых должно предшествовать применению диагностической математической модели. К таким отказам относятся, например, зависание плунжера ТНВД, зависание иглы форсунки, появление трещин в корпусных деталях и в топливном трубопроводе высокого давления. Эти отказы могут быть обнаружены как средствами диагностики, так и обычными штатными приборами дизеля. Например, при использовании средств виброакустической диагностики отказы можно регистрировать либо по отсутствию виброимпульсов (при зависании плунжера), либо по значительному изменению их формы и параметров. Вероятность одновременного появления двух и более рассматриваемых отказов ничтожно мала. Поэтому каждый из них можно идентифицировать по результатам предварительного физического моделирования этих отказов.

Выбираемый метод диагностирования ТА должен позволить получить некий комплекс структурных параметров, который определённым образом связан с соответствующим комплексом диагностических параметров. Анализ этих связей должен позволить сделать однозначный вывод о техническом состоянии ТА и степени изношенности её элементов.

Традиционным методом диагностирования ТА является так называемый «метод измерения амплитудно-фазовых параметров изменения давления в нагнетательной магистрали топливной системы». При реализации метода записывают осциллограммы давления перед форсункой. Суть метода состоит в оценке качества процесса впрыскивания топлива и состояния ТА по параметрам кривой давления и по расположению её относительно отметки ВМТ поршня. Описывая положительные свойства этого метода, авторы отмечают ограниченность его возможностей [15]. К опубликованному анализу добавим, что для реализации рассматриваемого метода необходимо размещать в топливном трубопроводе высокого давления специального датчика давления, что в условиях эксплуатации может оказаться весьма проблематичным. К тому же имеет место проблема обеспечения необходимых ресурса и стабильности метрологических свойств датчика. Изложенное позволяет заключить, что описываемый метод диагностирования применим преимущественно в заводских и исследовательских испытаниях дизеля.

При эксплуатации дизеля для оценки технического состояния ТА целесообразно применять метод диагностирования, основанный на использовании простых, надёжных, универсальных средств. Желательно, чтобы все элементы системы по отношению к объекту были внешними, легко устанавливаемыми на объекте и не искажающими происходящие в нём процессы. Система должна позволять выполнять операции диагностирования, по возможности, без вывода дизеля из нормального режима эксплуатации. Именно таким требованиям отвечает виброакустический метод [1], [16], [17].

В общем случае метод контроля вибрации включает в себя анализ так называемых «энергетических характеристик» — перемещений, скоростей и ускорений (считаем, правильнее назвать



$$\left. \begin{aligned} k_{1-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{1-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{1-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{1-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{1-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta p_{\text{нпф}}; \\ k_{2-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{2-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{2-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{2-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{2-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{нпф}}; \\ k_{3-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{3-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{3-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{3-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{3-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{ф}}; \\ k_{4-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{4-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{4-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{4-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{4-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{нпп}}; \\ k_{5-1}\delta P_{\text{зат}} + k_{5-2}\delta\Phi_{\text{нпп}} + k_{5-3}\delta\Delta_{\text{пп}} + k_{5-4}\delta\Delta_{\text{иф}} + k_{5-5}\delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{н}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для реализации описанных принципов построения локальной диагностической системы ТА требуется, в частности, располагать значениями коэффициентов влияния в системе уравнений (4). Очевидно, что их необходимо определять для каждого диагностируемого дизеля. При этом желательно было бы выполнить соответствующие эксперименты либо на дизеле, либо на специально оборудованном топливном стенде. Это весьма трудоёмкая работа. Поэтому для решения указанной задачи, т. е. для описания количественных связей между структурными и диагностическими параметрами целесообразно использовать математическое моделирование процессов, происходящих в дизеле. Для этого может быть использована разработанная нами математическая модель внутрицилиндровых процессов и топливоподачи, реализованная в авторской программе «CyberDiesel» [18], [19].

Применительно к дизелю типа ДН 23/30, для которого в нашем распоряжении имеется большой объём экспериментального материала, математическая диагностическая модель ТА, полученная посредством вычислительного эксперимента, имеет вид системы уравнений (5):

$$\left. \begin{aligned} +1,9 \delta P_{\text{зат}} &+ 0,0025 \delta\Delta_{\text{пп}} &+ 0,0013 \delta\Delta_{\text{иф}} &= \delta p_{\text{нпф}}; \\ -0,26 \delta P_{\text{зат}} &- 0,043 \delta\Delta_{\text{пп}} &- 0,00046 \delta\Delta_{\text{иф}} &= \delta\varphi_{\text{нпф}}; \\ -0,17 \delta P_{\text{зат}} &- 0,0063 \delta\Delta_{\text{пп}} &- 0,0063 \delta\Delta_{\text{иф}} - 0,0053 \delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{ф}}; \\ +1,2 \delta\Phi_{\text{нпп}} &- 0,0055 \delta\Delta_{\text{пп}} &&= \delta\varphi_{\text{нпп}}; \\ -0,27 \delta P_{\text{зат}} &&+ 0,0098 \delta\Delta_{\text{иф}} - 0,060 \delta(\mu f_{\text{со}}) &= \delta\varphi_{\text{н}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аналогичная математическая модель может быть получена как для других локальных систем, так и для общей системы диагностирования дизеля. В последнем случае описанные выше диагностические параметры получаются в результате индицирования его рабочего процесса и расчёта характеристик тепловыделения по индикаторным диаграммам с использованием нашей программы InDiagExpert [20].

При наличии достоверной математической диагностической модели диагноз технического состояния дизеля может быть определён по разности значений текущего структурного параметра и допустимого значения данного параметра.

### Заключение

На техническое состояние дизельного двигателя влияют огромное число его структурных параметров. Это делает невозможным создание единой системы диагностирования дизеля. Авторами статьи предложено создать комплекс диагностических систем, построенный по иерархическому принципу. Комплекс состоит из общей системы и ряда локальных систем. При решении задачи поддержания на исходном уровне топливной экономичности дизеля в процессе его эксплуатации следует использовать комплекс диагностических систем, в котором работа общей системы основана на результатах индицирования внутрицилиндровых процессов.

Анализ параметров индикаторной диаграммы позволяет определить целесообразность последующего использования той или иной локальной системы диагностирования. В состав локальных могут входить, например, системы диагностирования топливной аппаратуры, агрегатов воздухообеспечения, цилиндро-поршневой группы деталей. Авторами разработана локальная система диагностирования топливной аппаратуры. Обоснован выбор соответствующих структур-

ных и диагностических параметров. При выборе метода технического диагностирования учтено предъявляемое к нему важнейшее требование — возможность выполнения операций без вывода дизеля из нормального режима эксплуатации. Этому требованию наилучшим образом отвечает виброакустический метод. Установлены связи между структурными и диагностическими параметрами в общей и локальной системах диагностирования. Указанные связи могут быть выражены посредством диагностических математических моделей, при разработке которых нами применен метод малых отклонений. Использование подобных диагностических моделей в процессе эксплуатации позволит оценить текущее техническое состояние дизеля и выполнить его прогноз.

В данной статье в соответствии с её названием рассмотрены основные принципы построения системы диагностирования судового дизеля. Реализации этих принципов в виде структурных схем диагностических комплексов, а также соответствующим техническим решениям будут посвящены последующие наши публикации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хруцкий О. В. Семь бесед по вибродиагностике / О. В. Хруцкий, С. Н. Рогов. — СПб.: ЗАО «ТСТ», 2003. — 102 с.
2. Лашко В. А. Теория идентификации в приложении к задачам диагностики дизеля / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Международная науч.-техн. конф. «Двигатели-2008». Хабаровск, 15 – 19 сентября 2008 г.: Материалы конференции. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2008. — С. 264–269.
3. Викулов С. В. Методы построения алгоритмов диагностирования элементов судовых дизелей на основе системного подхода: дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Викулов. — Новосибирск: НГАВТ, 2013. — 312 с.
4. Нигматуллин Ш. Ф. Совершенствование методов и средств диагностирования топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей: дис. ... канд. техн. наук / Ш. Ф. Нигматуллин. — Уфа: Башкирский ГАУ, 2002. — 157 с.
5. Грехов Л. В. Диагностирование топливной аппаратуры автотракторных дизелей / Л. В. Грехов, И. И. Габитов, А. В. Неговора // Международная науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения»: материалы конф., 23 – 25 апреля 2003 г. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — С. 118–125.
6. Анисимов А. А. Контроль технического состояния агрегатов системы наддува тепловозных дизелей методом малых отклонений / А. А. Анисимов, С. М. Овчаренко, Е. И. Сковородников // Международная науч.-техн. конф. «Двигатели-2008». Хабаровск, 15 – 19 сентября 2008 г.: материалы конф. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2008. — С. 253–257.
7. Грехов Л. В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением / Л. В. Грехов. — М.: Легион-Автодата, 2009. — 176 с.
8. Лашко В. А. Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1. — С. 57–68.
9. Лашко В. А. Средства и методы диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.
10. Маркелов А. А. Диагностирование дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Маркелов. — Хабаровск: ТГУ, 2007. — 175 с.
11. Коньков А. Ю. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19–23.
12. Коньков А. Ю. Количественное оценивание износов и разрегулировок тепловозного дизеля по данным индицирования рабочих процессов / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. — 2009. — Т. 1. — № 5 (17). — С. 102–109.

13. Гаврилов В. В. Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164.
14. Васильев-Южин Р. М. Совершенствование метода параметрического диагностирования судовых дизелей. Основные принципы / Р. М. Васильев-Южин, П. М. Гоцак, С. И. Золотарев // Двигателестроение. — 1988. — № 6. — С. 46–48.
15. Яранцев М. В. Оценивание износа плунжерных пар без разборки топливного насоса высокого давления дизеля / М. В. Яранцев, А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2013. — № 2 (29). — С. 123–132.
16. Гаврилов В. В. Топливная аппаратура дизеля как объект виброакустической диагностики / В. В. Гаврилов, П. А. Щукин, В. Ю. Машенко [и др.] // Межвузовская науч.-техн. конф. : сб. материалов. Санкт-Петербург, 25 – 28 апреля 2000 г. — СПб.: Изд-во Военно-морского инженерного института, 2000. — С. 378–379.
17. Гаврилов В. В. Методика виброакустического диагностирования топливной аппаратуры дизеля / В. В. Гаврилов, О. В. Хруцкий, П. А. Щукин [и др.] // Науч.-техн. конф. «Двигатели внутреннего сгорания двадцать первого века»: материалы конф. Санкт-Петербург, 20 сентября 2000 г. — СПб.: Издательский центр СПбГМТУ, 2000. — С. 59–60.
18. Гаврилов В. В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... д-р техн. наук / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 359 с.
19. Машенко В. Ю. Повышение эффективности рабочих процессов в судовом дизеле согласованным выбором параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания: дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Машенко. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 209 с.
20. Машенко В. Ю. Программа InDiagExpert расчета характеристик тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. Ю. Машенко, В. В. Гаврилов // IV Всероссийская межотраслевая науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы морской энергетики»: материалы конф. Санкт-Петербург, 12 – 13 февраля 2015 г.:— СПб.: Издат. центр СПбГМТУ, 2015. — С. 45–46.

## PRINCIPLES OF HIERARCHICAL COMPLEX SYSTEMS OF DIAGNOSING MARINE DIESEL ENGINE

*By taking into account of significant amount of the factors affecting technical condition of the diesel engine, it is impossible to develop integrated diagnostic system for detection of sufficient amount of malfunctions reducing fuel efficiency of the engine. Therefore, in operating practice of the diesel as a rule we have to apply a combination of mismatched means of diagnostics. In the article is described the approach suggested by the authors regarding development of hierarchical structure of engine diagnostic systems consisting of the general and a number of local systems. The interconnection of these systems is specified. The operation of general diagnostic system is based on application of results of analysis of indicator diagrams, which enables to limit the area of further troubleshooting of the diesel engine by means of the local systems. The local diagnostic system has been developed for fuel equipment based on application of vibroacoustic method of measurements and results of analysis of vibration records. The composition of structural and diagnostic parameters has been justified for implementation of general and local diagnostic systems of the diesel engine. The communication between specified parameters has been established as diagnostic mathematical models, which in this case are developed with application of small-deflection method. Application of suggested structure of diagnostic systems in operation process will allow to estimate a current technical condition of the diesel engine and make its forecast.*

*Keywords: technical condition of diesel engine, functional diagnostics, indicator diagram, fuel equipment, structural and diagnostics parameters, use of vibroacoustic method.*

## REFERENCES

1. Khrutsky, O. V., and S. N. Rogov. *Sem' besed po vibrodiagnostike*. SPb.: ZAO "TCT", 2003.

2. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. "Teorija identifikacii v prilozhenii k zadacham diagnostiki dizelja." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli-2008». Habarovsk, 15-19 sentjabrja 2008 g.: Materialy konferencii.* Habarovsk: Izd-vo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008.

3. Vikulov, S. V. Metody postroenija algoritmov diagnostirovanija jelementov sudovyh dizelej na osnove sistemnogo podhoda. Diss. Novosibirsk: NGAVT, 2013.

4. Nigmatullin, Sh. F. Sovershenstvovanie metodov i sredstv diagnostirovanija toplivnoj apparatury avtotraktornyh i kombajnovykh dizelej. Diss. Ufa: Bashkirskij GAU, 2002.

5. Grehov, L. V., I. I. Gabitov, and A. V. Negovora. "Diagnostirovanie toplivnoj apparatury avtotraktornyh dizelej." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Aktualnye problemy teorii i praktiki sovremennogo dvigatelestroenija»: materialy konferencii, 23-25 aprelja 2003 g (kypcu).* Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2003: 118–125.

6. Anisimov, A. A., S. M. Ovcharenko, and E. I. Skovorodnikov. "Kontrol tehničeskogo sostojanija agregatov sistemy nadduva teplovoznnyh dizelej metodom malyh otklonenij." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli-2008». Habarovsk, 15-19 sentjabrja 2008 g.: Materialy konferencii.* Habarovsk: Izd-vo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008: 253–257.

7. Grehov, L. V. Toplivnaja apparatura dizelej s jelektronnym upravleniem. M.: Legion-Avtodata, 2009.

8. Lashko, V. A., A. Y. Konkov, and A. A. Markelov. "The method of technical condition identification for a diesel engine by the display diagram analysis under the condition of ordinary operation." *Bulletin of PNU 1* (2007): 57–68.

9. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. Sredstva i metody diagnostirovanija dizelej po indikatornoj diagramme rabocheho processa. Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007.

10. Markelov, A. A. Diagnostirovanie dizelja po rezultatam raschjotno-jeksperimentalnogo issledovanija indikatornoj diagrammy v uslovijah rjadovoj jekspluatacii. Diss. Habarovsk: TGU, 2007.

11. Konkov, A. Ju., and V. A. Lashko. "Diagnosis of a Locomotive Engine by Means of Indicator Diagram Based on Identification Theory." *Dvigatolestroyeniye 3* (2009): 19–23.

12. Konkov, A. Ju., V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Kolichestvennoe ocenivanie iznosov i razregulirovok teplovoznogo dizelja po dannym indicirovanija rabochnih processov." *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija 1.5(17)* (2009): 102–109.

13. Gavrilov, Vladimir Vasilyevich, and Vladimir Yurievich Mashchenko. "Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 1(35)* (2016): 154–155.

14. Vasilev-Juzhin, R. M., P. M. Gocak, and S. I. Zolotarev. "Sovershenstvovanie metoda parametriceskogo diagnostirovanija sudovyh dizelej. Osnovnye principy." *Dvigatolestroyeniye 6* (1988): 46–48.

15. Yarantsev, M. V., A. Yu. Konkov, V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Evaluation of Plunger Wear without Removing the Diesel Fuel Injection Pump." *Bulletin of PNU 2(29)* (2013): 123–132.

16. Gavrilov, V. V. "Toplivnaja apparatura dizelja kak obekt vibroakustičeskoj diagnostiki." *Mezhvuzovskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija. Sankt-Peterburg, 25–28 aprelja 2000 g.: Sbornik materialov konferencii.* SPb.: Izd-vo Voenno-morskogo inzhenernogo instituta, 2000: 378–379.

17. Gavrilov, V. V., O. V. Hručij, P. A. Shhukin, and I. V. Gavrilov. "Metodika vibroakustičeskogo diagnostirovanija toplivnoj apparatury dizelja." *Nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dvigateli vnutrennego sgoranija dvadcat' pervogo veka». Sankt-Peterburg, 20 sentjabrja 2000 g.: Materialy konferencii.* SPb.: Izdatelskij centr SPbGMTU, 2000: 59–60.

18. Gavrilov, V. V. Metody povyšeniya kachestva smeseobrazovanija i sgoranija v sudovom dizele na osnove matematičeskogo i fizičeskogo modelirovanija lokal'nyh vnutricilindrovnyh processov. Diss. SPb.: SPbGMTU, 2004.

19. Mashhenko, V. Ju. Povyshenie jeffektivnosti rabochnih processov v sudovom dizele so-glasovannym vyborom parametrov toplivnoj apparatury i kamery sgoranija. Diss. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.

20. Mashhenko, V. Ju., and V. V. Gavrilov. "Programma InDiagExpert rascheta harakteristik teplovydelenija v dizele po indikatornym diagrammam." *Chetvertaja Vserossijskaja mezhotraslevaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Aktual'nye problemy morskoy jenergetiki». Sankt-Peterburg, 12–13 fevralja 2015 g.: Materialy konferencii.* SPb.: Izdatelskij centr SPbGMTU, 2015: 45–46.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Гаврилов Владимир Васильевич* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf\_sdvs@gumrf.ru*  
*Мащенко Владимир Юрьевич* —  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель.  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный морской технический  
университет»  
*masvladimir@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Gavrilov Vladimir Vasilyevich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*gavrilov@VG5647.spb.edu*  
*Mashchenko Vladimir Yurievich* —  
PhD, Senior Lecturer.  
Saint-Petersburg State Marine Technical  
University  
*masvladimir@yandex.ru*

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.*

**УДК 621.436**

**А. А. Иванченко,  
И. А. Щенников,  
А. А. Иванченко**

### ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СУДОВОГО ВЫСОКОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ М482

*В статье рассмотрены современные подходы к математическому моделированию внутрицилиндрового процесса, их основные преимущества и недостатки. Обосновано использование фундаментальных закономерностей смесеобразования и сгорания для решения оптимизационных задач по математическому моделированию экологических и эксплуатационных показателей судовых дизелей. Изложены теоретические основы протекания процессов тепловыделения в цилиндре судового дизеля. Предложена методология математического описания и управления процессом сгорания в цилиндре, основанная на использовании упрощённых полуэмпирических моделей и результатов экспериментальных работ. Проведена расчетно-экспериментальная апробация предложенного подхода при исследовании рабочего процесса судового дизельного двигателя М482 (12 ЧН18/20) с аккумуляторной топливной аппаратурой. Обоснованы рекомендации по дальнейшему улучшению рабочего процесса и характеристик топливной аппаратуры дизельного двигателя. Проведено обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований с формированием расчётной универсальной характеристики расхода топлива. Сделан вывод о возможности дальнейшей модернизации исследуемого дизеля.*

*Ключевые слова: эмиссия оксидов азота, эксплуатационные показатели, математическое моделирование внутрицилиндрового процесса.*

#### Введение

Ужесточение норм эмиссии NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> и CO<sub>2</sub> для дизельных установок судов выдвигает перед разработчиками судовых дизелей все более сложные и противоречивые задачи, связанные с качеством рабочего процесса и улучшением их эксплуатационных показателей, ставит в ряд актуальнейших проблем задачу внедрения системных принципов в управление процессом сгорания топлива.

Стремясь сократить расходы на доводку дизеля, ведущие разработчики заявили о создании сложных расчетных моделей, основанных на дифференциальных уравнениях гидродинами-

ки неразрывности жидкости, законах сохранения количества движения и энергии и дополненных уравнениями химической кинетики сгорания углеводородных топлив с реализацией расчетного цикла методом конечных объемов. В современных прикладных программах реализованы те или иные подходы к математическому описанию внутрицилиндровых процессов. Наиболее известны следующие программы: KIVA (Los Alamos); FIRE (AVL); VECTIS (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies), STAR-CD (Computational Dynamics Ltd), принципы функционирования которых приведены в работах [1], [2]. В рассмотренных публикациях отмечается недостаточная полнота наших представлений о физических и химических механизмах. Связанная с этим недоведенность указанных моделей и сложности в их использовании, сложность и быстротечность процесса сгорания в дизеле, а также требующийся для реализации моделей большой объем предварительных экспериментальных исследований явились причиной закрепления в практике доводки дизелей управления этим процессом посредством оптимизации одного какого-либо выбранного показателя его работы. Соответственно в практике решения тех или иных задач и, особенно, задач, направленных на улучшение эксплуатационных показателей дизеля и снижение вредных выбросов с отработавшими газами, экспериментальные методы, благодаря своей простоте и доступности, намного опередили теорию и, в основном, являются единственными. В этих условиях становится необходимой и обоснованной разработка методологии управления процессом сгорания. Экспериментальные исследования процесса сгорания топливовоздушной смеси в дизелях в настоящее время проводятся большим количеством авторских коллективов как в России, так и за рубежом, среди них отметим работы [3] – [6]. В работе [5] для решения задач, связанных с достижением допустимого уровня выбросов окислов азота приемлемого уровня дымности и топливной экономичности дизельного двигателя, предложено обращаться к анализу фундаментальных закономерностей смесеобразования и сгорания с дополнительным привлечением результатов экспериментальных работ.

#### **Разработка методологии математического описания и управления процессом сгорания с целью улучшения эксплуатационных и экологических параметров дизельного двигателя**

Известно, что преобладающая доля топлива, впрыснутого в цилиндр дизеля к моменту воспламенения, сосредоточена в объеме топливно-воздушных факелов в виде капель. Закономерности протекания процесса сгорания, образования окислов азота и сажи при этом существенно зависят от закона топливоподачи  $g(\tau)$ , от характеристик топливно-воздушных факелов, сформировавшихся за период задержки воспламенения —  $l$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ , от условий взаимодействия сосредоточенного в их объеме топлива с воздушным зарядом и стенками камеры сгорания (характеризуемые локальными  $\alpha$ , процессами тепло- и массообмена между каплями и окружающей ее средой). Все эти параметры определяют состояние рабочего тела в каждый момент цикла: давление  $P(x, y, z, \tau)$ , температуру  $T(x, y, z, \tau)$ , концентрационную неоднородность  $C_i(x, y, z, \tau)$ , а также внешние показатели дизеля (мощность, экономичность, токсичность, дымность, механическую и тепловую напряженность дизеля).

Определенные возможности для выработки методологии математического описания и управления процессом сгорания с целью достижения допустимого уровня выбросов окислов азота, приемлемого уровня дымности и топливной экономичности открывает совместное использование модели локального очага горения, разработанной в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и представленной в работах [7], [8], и модели численного моделирования рабочего процесса ДВС (дизелей, газовых двигателей и газодизелей) [9]. Предпосылками к этому являются большое количество экспериментальных и теоретических исследований, выполненных с целью улучшения экологических показателей дизелей, и исследования условий образования сажи и окислов азота в реальных условиях дизельного цикла, что дает, в сущности, для теории вспомогательный материал.

Приведенные в работе [10] исследования показывают, что наибольшее влияние на характер закона сгорания топлива в дизеле оказывают характеристики топливовоздушной смеси в момент

самовоспламенения, динамика развития и геометрия топливовоздушных факелов, динамика изменения значений локальных коэффициентов избытка воздуха в различных зонах камеры сгорания ( $\alpha$ ) и интенсивность испарения (горения) топлива. Таким образом, можно предположить, что наибольшей эффективностью при улучшении эксплуатационных показателей судового дизеля отличаются мероприятия, направленные на рационализацию закона подачи топлива и управление процессом самовоспламенения. В качестве управляемых параметров в рамках предлагаемого подхода заслуживают рассмотрения цикловая подача, угол опережения впрыскивания топлива, закон изменения давления подачи топлива, размер и расположение сопловых отверстий и другие показатели.

С учетом изложенного, положительные результаты при исследованиях и оптимизации закона горения топлива в дизеле можно получить, используя упрощенные полуэмпирические модели, для настройки которых не требуется проведения подробных экспериментальных исследований.

Для рассматриваемого типа моделей наибольшее распространение в отечественной мировой практике получила зависимость профессора И. И. Вибе и ее производные, полученные на основе качественных представлений о скорости цепных реакций в цилиндре дизеля. В дифференциальной форме зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -c \cdot \frac{(m+1)}{\varphi_z} \left( \frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_z} \right)^m e^{c \cdot \left( \frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_z} \right)^{m+1}}, \quad (1)$$

где  $x$  — текущая доля выгоревшего топлива;  $\varphi$  — текущий угол п.к.в.;  $\varphi_{\text{нс}}$  — угол начала видимого сгорания топлива;  $c$  — коэффициент, зависящий от доли прореагировавшего топлива;  $\varphi_z$  — условная продолжительность сгорания;  $m$  — показатель характера сгорания.

#### Расчетно-экспериментальная апробация предлагаемого подхода

В качестве примера использования полуэмпирической модели сгорания топлива в цилиндре дизеля (1) для решения практических задач и выработки рекомендаций по улучшению эксплуатационных и экологических показателей дизеля рассмотрим исследования рабочего процесса опытного судового дизельного двигателя 12 ЧН 18/20 (рис. 1) с аккумуляторной топливной системой, подробное исследование параметров которого (с проведением индицирования рабочего процесса) представлено в работе [11].

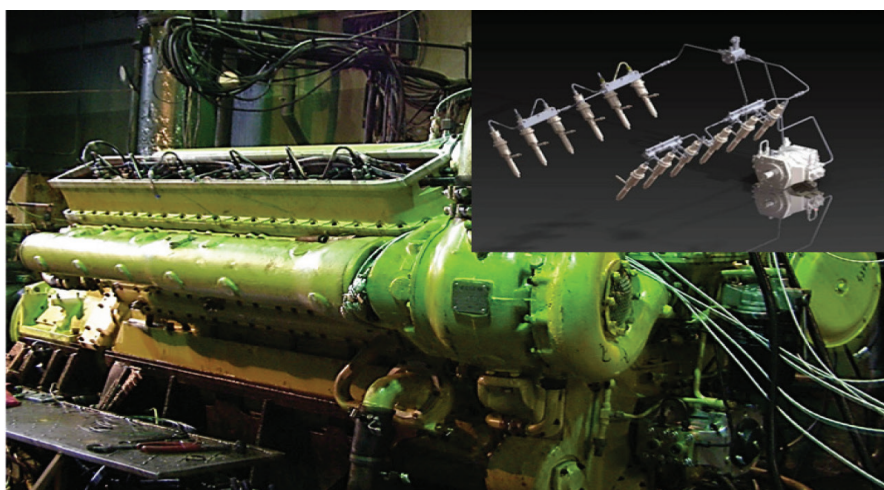


Рис. 1. Судовой дизель М 482 (12ЧН18/20) с аккумуляторной топливной аппаратурой

Определение настроечных показателей математической модели выгорания топлива проводилось при помощи построения так называемых логарифмических анаморфоз выгорания топлива, которые получались путем математической обработки экспериментальных индикаторных диа-

грамм давления газов в цилиндре дизеля, полученных с использованием методики, изложенной в [3]. Пример диаграммы представлен на рис. 2.

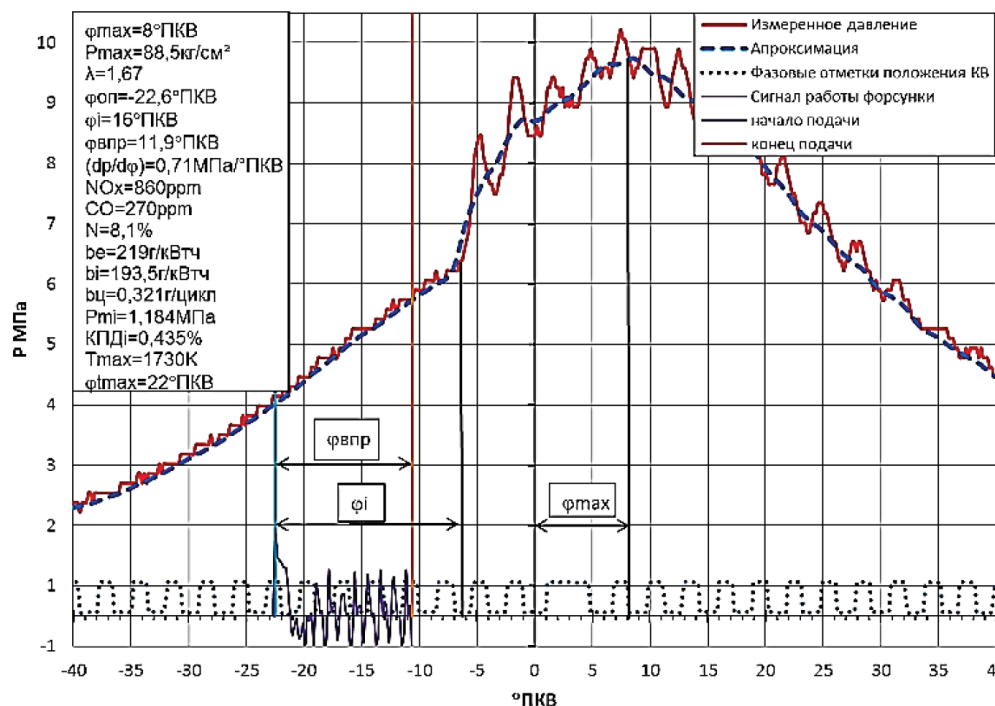


Рис. 2. Индикаторная диаграмма (пример)

В исследовании использовались экспериментальные и расчетные данные о рабочем процессе дизеля с различными настройками топливной аппаратуры. В качестве математической модели для решения поставленных задач использован программный комплекс ИМПУЛЬС, дополненный алгоритмом для расчета образующихся оксидов азота.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований по оптимизации настроек топливоподачи на номинальном режиме работы дизеля приведены в работе [12]. Они показывают, что опытный дизель с аккумуляторной ТА по большинству эксплуатационных характеристик соответствует своему прототипу. На  $6 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$  улучшился расход топлива на номинальном режиме, существенно улучшились показатели дымности ОГ ( $N$ ). Вместе с тем исследования показали, что зона экономичной работы дизеля не соответствует вероятным эксплуатационным режимам его использования. Измеренные значения  $c_{\text{NOx}} = 860 \text{ ppm}$  ( $8,9 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ ) с недостаточным запасом соответствуют требованиям действующим нормам. Указанные факты потребовали дополнительных исследований. В качестве одной из причин неоптимальности процесса сгорания рассмотрена несогласованность формы топливного факела с формой КС.

Проведены расчетно-экспериментальные исследования развития топливного факела, которые показали, что в опытном дизеле на номинальном режиме работы к моменту самовоспламенения в цилиндр подается  $100\%$  цикловой подачи топлива и значительная ее часть достигает стенок камеры сгорания, температура которых на серийном двигателе —  $270 - 280^\circ \text{C}$ . Это ухудшает эффективность горения. Отсутствие значительного повышения  $p_{\max}$  можно объяснить увеличением периода задержки самовоспламенения с  $10^\circ \text{ п.к.в.}$  до  $17^\circ \text{ п.к.в.}$ , что, в свою очередь, может быть связано с возросшей интенсивностью поступления топлива в цилиндр.

На основе опыта доводки базового двигателя ЧН18/20 для улучшения протекания процесса сгорания в исследуемом дизеле и для увеличения плотности воздушного заряда в КС в ходе расчетных исследований рассмотрены следующие возможности: увеличение  $\epsilon$  с  $13,5$  до  $15,5$ ; смещение  $\phi_{\text{оп}}$  с  $-23^\circ \text{ п.к.в.}$  до  $-15^\circ \text{ п.к.в.}$  относительно ВМТ; снижение  $T_{\text{int}}$  на  $18 \text{ К}$ ; сокращение периода продувки с  $100^\circ \text{ п.к.в.}$  до  $80^\circ \text{ п.к.в.}$ ; увеличение действительной степени сжатия путем изменения

фаз газораспределения. В качестве ограничений в ходе моделирования принималось  $p_{\max}$  не выше 11,0 МПа;  $T_g$  — не выше 833 К (560 °С).

Основные результаты расчетных исследований представлены на рис. 3. Полученные данные позволили в качестве рационального предложения по доводке опытного дизеля принять вариант модернизации № 3 с  $\varepsilon = 15,0$ ;  $\varphi_{\text{он}} = -15,0^\circ$  п.к.в.;  $T_{\text{int}} = 314$  К.

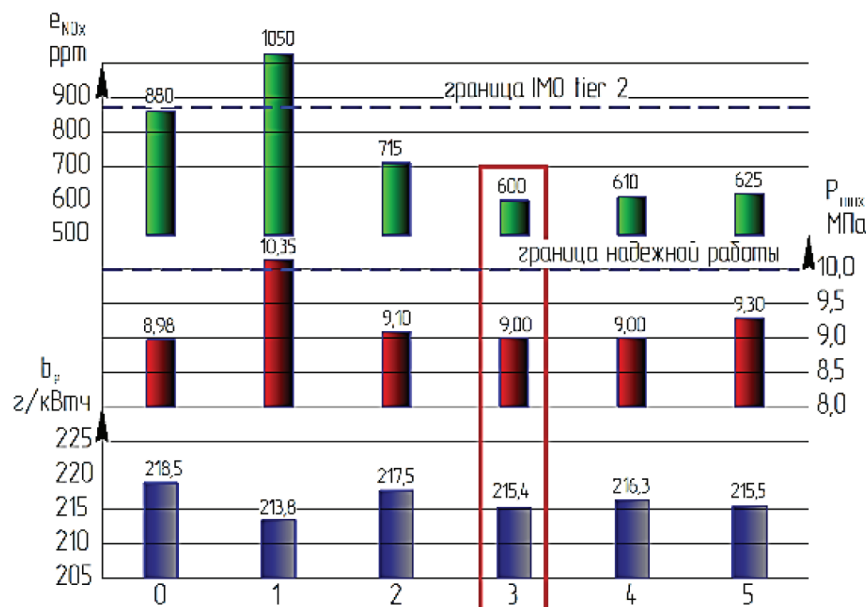


Рис. 3. Изменение исследуемых параметров дизеля в процессе моделирования: 0 — базовый (экспериментальный) дизель; 1 ... 5 — дизель с модернизациями

### Обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований

Сравнение экспериментальной и расчетной универсальной характеристики  $b$  (рис. 4) показывает, что предложенная модернизация обеспечивает улучшение топливной экономичности на номинальном режиме на 3 г/(кВт·ч) при  $c_{NOx} = 600$  ppm (6,2 г/(кВт·ч)). В поле эксплуатационных режимов  $b$  уменьшилось на 5 – 10 г/(кВт·ч). Расчеты показывают, что дизель после предлагаемой модернизации будет гарантированно удовлетворять требования IMO tier-2.

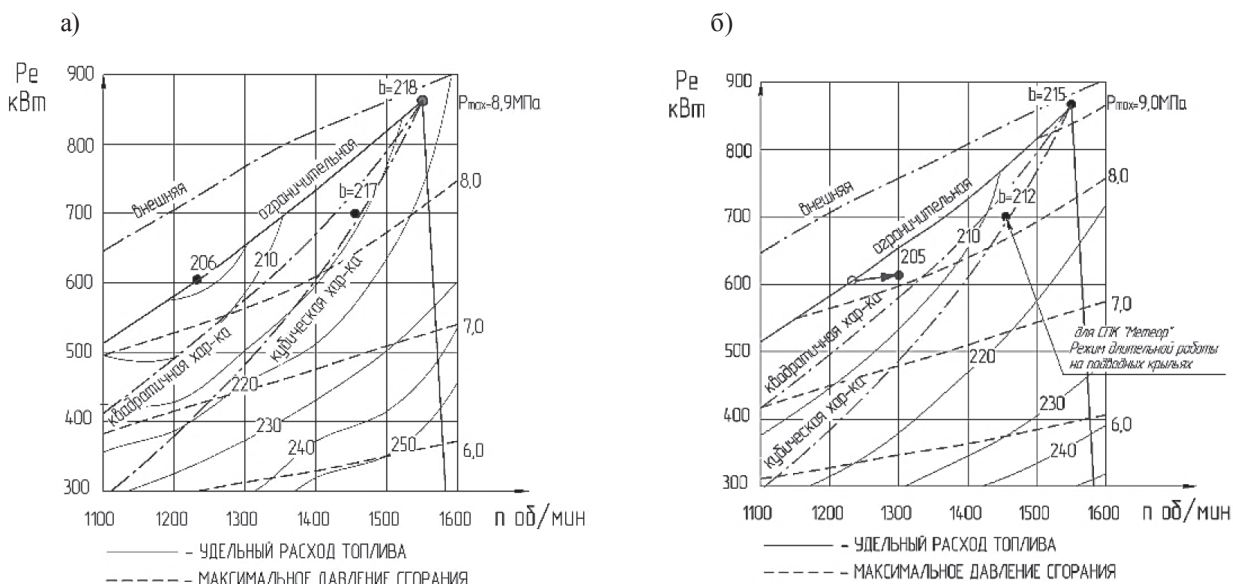


Рис. 4. Универсальная характеристика расхода топлива для существующего дизеля (а) и рассчитанная по результатам предлагаемых модернизаций (б)

В целях дальнейшего совершенствования процесса сгорания топлива в цилиндрах исследуемого дизеля можно рекомендовать уменьшение диаметра соплового отверстия  $d_{\phi}$  с 0,27 до 0,25 ... 0,23 мм, сокращение количества сопловых отверстий с 8 до 6 ... 7, угол в профиле между сопловыми отверстиями  $\theta_1$  от 140 до 150° с одновременным использованием всего диапазона изменения давления впрыска согласно характеристикам топливной аппаратуры (от 60 МПа до 160 МПа), что позволит повысить управляемость процесса сгорания.

### Выводы

Необходимость применения математического моделирования внутрицилиндровых процессов при проектировании и доводке судовых дизельных двигателей доказана многолетним опытом подобных работ. Математические модели внутрицилиндрового процесса, реализованные в предлагаемых на рынке расчетных программах, с высокой степенью достоверности описывают физико-химические процессы, происходящие в цилиндре и системах дизельного двигателя. Вместе с тем, практическое использование таких моделей при решении некоторых оптимизационных задач (в частности, при улучшении эксплуатационных и экологических показателей судовых дизелей) зачастую нерационально по причине сложности их корректной настройки и высокой стоимости использования. Указанное обстоятельство потребовало от авторов статьи разработки методологии математического описания и управления процессом сгорания в цилиндре дизеля для осуществления исследований по улучшению экологических и эксплуатационных показателей судового дизеля.

В основу методологии положено теоретическое описание процессов тепловыделения в цилиндре судового дизеля, дополненное экспериментальными данными по индентификации рабочего процесса с последующей тщательной настройкой и решением полуэмпирического уравнения профессора Виббе, описывающего процесс сгорания в цилиндре.

Для подтверждения верности предложенной методологии проведена ее расчетно-экспериментальная апробация на судовом высокооборотном дизеле M482 (12ЧН18/20) с аккумуляторной топливной системой. Управляющее воздействие на процесс сгорания осуществлялось при помощи изменения показателей заряда цилиндра в момент впрыска топлива.

Математическое моделирование рабочего процесса при рассматриваемых корректировках обеспечило улучшение топливной экономичности на номинальном режиме на 3 г/(кВт·ч), а в поле эксплуатационных режимов на 5 – 10 г/(кВт·ч), при этом выбросы оксидов азота получены на уровне  $c_{\text{NOx}} = 600$  ppm (6,2 г/(кВт·ч)). В качестве рационального предложения по доводке опытного дизеля принят вариант  $\varepsilon = 15,0$ ;  $\varphi_{\text{оп}} = -15,0^\circ$  п.к.в.;  $T_{\text{инт}} = 314$  К.

Полученный практический опыт исследовательских работ позволяет обоснованно подходить к разработке рекомендации по улучшению эксплуатационных и экологических параметров судового дизельных двигателей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: автореф. дис. ... д-р техн. наук / А. С. Кулешов. — М., 2011.
2. Машиностроение. Энциклопедия. — Т. IV–14 / Л. В. Грехов. Двигатели внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 2013.
3. Щенников И. А. Прогнозирование эксплуатационных показателей дизельной энергетической установки судна на этапе проектирования ее элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. А. Щенников. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015.
4. Мурзин В. С. Эффективность раздельного впрыскивания топлива в камеру сгорания дизеля / В. С. Мурзин, А. П. Маслов, Е. А. Лазарев // Двигателестроение. — 2008. — № 3. — С. 13–16.
5. Иванченко А. А. Систематизация методов управления процессом сгорания и их общая оценка / А. А. Иванченко, С. В. Терентьев, В. Н. Соловьев // Сб. науч. тр. «Судостроение и судоремонт». — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2000. — С. 64–73.

6. Кавтарадзе Р. З. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, А. А. Зеленцов [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2011. — № 4. — С. 83–102.

7. Иванченко А. А. Физические предпосылки и проблемы описания процесса сгорания в дизеле / А. А. Иванченко, А. А. Белов // Водные пути и гидротехнические сооружения: тр. науч.-методич. конф. — Т. 1. Водные пути и гидротехнические сооружения, информационные технологии, портовая техника и электромеханика, судостроение и судоремонт. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2006. — С. 270–282.

8. Матвеев В. В. Численное моделирование рабочего процесса ДВС (дизелей, газовых двигателей и газодизелей): учеб. пособие / В. В. Матвеев, В. Т. Бордуков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2002. — 173 с.

9. Чесноков С. А. Моделирование внутрицилиндровых процессов в дизелях методом химического турбулентного тепломассообмена / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов, С. А. Потапов, П. В. Михайлов // Двигателестроение. — 2010. — № 1. — С. 3–8.

10. Системы управления дизельными двигателями: пер. с нем. — 1-е изд. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.

11. Иванченко А. А. Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.

12. Иванченко А. А. Прогнозирование показателей опытного судового дизеля 12ЧН18/20 с аккумуляторной топливной аппаратурой / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // Материалы 4 Всероссийской межотраслевой науч.-техн. конференции, посвященной 125-летию В. А. Ваншейдта, 12 – 13 февраля 2015 г. — СПб.: Изд-во СПбГМУ, 2015. — С. 69–71.

## PROBLEMS AND EXPERIENCE OF MATHEMATICAL MODELING NO<sub>x</sub> EMISSIONS AND OPERATING CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED DIESEL ENGINE M482

*The article considers modern approaches to mathematical modeling of nutriti-lindrovij process, their main advantages and disadvantages. It justifies the use of fundamental of fundamental laws of mixture formation and combustion for solving optimization problems on Mata-automatic modeling of environmental and operational characteristics of marine diesel engines. The indicated theoretical foundations of the processes of heat release in the cylinder of marine diesel engine. Proposed methodology of mathematical description and control of the combustion process in the cylinder based on the use of simplified semi-empirical models and results of experimental work. A calculation-experimental approbation of the proposed approach in the study of working process of ship diesel engine M482 (12 ЧН18/20) with accumulator fuel equipment was performed. Recommendations for further improvement of the working process and characteristics of the fuel equipment of the diesel engine were substantiated. The generalization of the results of calculation and experimental studies of the formation of settlement characteristics of universal consumption was performed. The conclusion about the possibility of further modernization of the investigated diesel engine was made.*

*Keywords: emission of nitrogen oxides, performance, mathematical modelling of working process of diesel engine.*

### REFERENCES

1. Kuleshov, A. S. Razvitie metodov rascheta i optimizacija rabochih processov DVS. Abstract of Dr. diss. M., 2011.
2. Grekhov, L V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Entsiklopediya. Tom IV-14. M.: Mashinostroenie, 2013.
3. Shhennikov, I. A. Prognozirovanie jekspluatacionnyh pokazatelej dizelnoj jenergeticheskoy ustanovki sudna na jetape proektirovanija ee jelementov. Abstract of PhD diss. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
4. Murzin, V. S., A. P. Maslov, and E. A. Lazarev. "Effectiveness of Separate Fuel Injection into the Engine Combustion Chamber." *Dvigatelistroyeniye* 3 (2008): 13–16.

5. vanchenko, A. A., S. V. Terentev, and V. N. Solovev. "Sistematizacija metodov upravljenja processom sgoranija i ih obshhaja ocenka." *Sbornik nauchnyh trudov «Sudostroenie i sudoremont»*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2000: 64–73.
6. Kavtaradze, R. Z., D. O. Onishchenko, A. A. Zelentsov, S. M. Kadyrov, and M. M. Aripdzhanov. "Computational and Experimental Study of Influence of Piston's and Sleeve's Thermal Insulation on Formation of Nitrogen Oxides in Combustion Products of High-Speed Diesel." *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 4 (2011): 83–102.
7. Ivanchenko, A. A., and A. A. Belov. "Fizicheskie predposylki i problemy opisanija processa sgoranija v dizele." *Vodnye puti i gidrotehnicheskie sooruzhenija: trudy nauchno-metodicheskoy konferencii. T.1. Vodnye puti i gidrotehnicheskie sooruzhenija, informacionnye tehnologii, portovaja tehnika i jelectromehanika, sudostroenie i sudoremont*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2006: 270–282.
8. Matveev, V. V., and V. T. Bordukov. *Chislennoe modelirovanie rabocheho protsessa DVS (dizeley gazovyh dvigateley i gazodizeley): uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2002.
9. Chesnokov, S. A., N. N. Frolov, S. A. Potapov, and P. V. Mikhailov. "Modelling of In-Cylinder Processes Based on Chemical Turbulent Heat-Mass Exchange." *Dvigatelistroyeniye* 1 (2010): 3–8.
10. *Sistemy upravlenija dizelnymi dvigateljami* / per. s nem. 1 ed. M.: ZAO KZhI «Za rulem», 2004.
11. Ivanchenko, A. A., V. A. Makurov, and I. A. Shhennikov. "Selecting a mathematical model for describing characteristics of the fuel burnup at operational development marine diesel engine with common rail system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 31–37.
12. Ivanchenko, A. A., and I. A. Shhennikov. "Prognozirovanie pokazatelej opytnogo sudovogo dizelja 12ChN18/20 s akkumuljatornoj toplivnoj apparaturoj." *Materialy 4-oj Vserossijskoj mezhotraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii posvjashhennoj 125-letiju V.A. Vanshejdta, 12-13 fevralja 2015g*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015: 69–71.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванченко Александр Андреевич —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
ivanchenkoa@gumrf.ru  
Щенников Иван Андреевич —  
кандидат технических наук, инженер-конструктор.  
ПАО «ЗВЕЗДА»  
ivanschennikov@yandex.ru  
Иванченко Андрей Александрович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Иванченко Александр Андреевич.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
kaf\_seu@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanchenko Aleksandr Andreevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
ivanchenkoa@gumrf.ru  
Shchennikov Ivan Andreevich —  
PhD, Design Engineer.  
Public joint-stock company «ZVEZDA»  
ivanschennikov@yandex.ru  
Ivanchenko Andrei Aleksandrovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Ivanchenko Aleksandr Andreevich.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
kaf\_seu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621:313

Ю. Сан,  
А. П. Сеньков

## СРАВНЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ И ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКАМИ СТАТОРА

*В статье выполнено сравнение по массе и габаритам двух видов вентильных электродвигателей с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ), отличающихся конструкцией статора: с распределенной обмоткой статора и с зубцовым шагом обмотки статора. Показано, что в машинах с зубцовым шагом обмотки статора при заданном диаметре расточки статора число пар полюсов ротора может быть значительно больше, чем в машинах с распределенной обмоткой статора. Вследствие этого в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора магнитный поток полюса и необходимая ширина ярма магнитопровода статора и ротора уменьшаются. В результате расчета установлено, что масса и габариты магнитопровода статора и ротора в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки оказываются меньше. Кроме того, катушки ВДПМ с зубцовым шагом обмотки имеют длину лобовых частей меньше, чем катушки ВДПМ с распределенной обмоткой статора, что также снижает массу и габариты обмотки статора.*

*Ключевые слова:* вентильный электродвигатель, постоянные магниты, габариты и масса, зубцовые обмотки, распределенные обмотки статора.

### Введение

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ), имеющие высокий КПД, минимальные массу и габариты, нашли широкое применение в самых разнообразных управляемых электроприводах: от приборных электроприводов мощностью в доли ватта до судовых гребных электрических установках с выходной мощностью в несколько мегаватт. По конструкции ротора различают ВДПМ с цилиндрическим ротором, которые применяются чаще, и ВДПМ с дисковым ротором. По конструкции статора различают ВДПМ с двухслойной распределенной обмоткой статора, машины с зубцовым шагом, описанные в публикации [1, с. 9], и машины с поперечным магнитным потоком, конструкция которых приведена в источниках [2], [3].

Машины с поперечным магнитным потоком находятся на стадии исследования и пока не применяются. ВДПМ с распределенной обмоткой статора известны с 60-х гг. XX в. и широко применяются в электроприводах [4]. ВДПМ с зубцовым шагом появились примерно двадцать лет назад, согласно данным источников [5], [6], но в ряде электроприводов они предпочтительнее, чем машины с распределенной обмоткой статора. В зарубежных публикациях ВДПМ с зубцовым шагом называют «with non-overlapping concentrated windings» (с неперекрывающимися сосредоточенными обмотками) [7]. Как и ВДПМ с распределенной обмоткой статора, ВДПМ с зубцовым шагом позволяют получить высокий обмоточный коэффициент и хорошую форму электродвижущей силы в фазах, от которой зависит КПД машины. В публикации [7] значения обмоточного коэффициента различных конструктивных вариантов ВДПМ с зубцовым шагом определены с помощью векторных диаграмм, а в источниках [8], [9] аналогичные значения обмоточного коэффициента получены аналитическим способом.

### Основная часть

Основное различие двух видов ВДПМ проявляется в массогабаритных характеристиках, которые зависят от числа пар полюсов магнитного поля ротора и числа пазов (зубцов) на полюс и

фазу  $q$ . В ВДПМ с распределенной обмоткой статора  $q \geq 1$ , при этом разработчики машин стараются обеспечить  $q$  до нескольких единиц, поскольку с увеличением  $q$  возрастает обмоточный коэффициент и форма ЭДС в фазах получается более близкой к синусоиде. Ширина  $\tau$  полюса ротора равна  $\tau = tqm$ , где  $t$  — ширина зубцового деления магнитопровода статора;  $m$  — число фаз статора. Во время работы машины на зубцы магнитопровода статора действуют радиальные и тангенциальные силы, которые зубцы статора должны выдерживать без существенных деформаций. Минимальная ширина зубцов статора, обеспечивающих механическую прочность, равна 5 – 6 мм, а ширина зубцового деления магнитопровода  $t$  примерно в два раза больше. Тогда при  $m = 3$  и  $q = 1$  минимальная ширина полюса  $\tau = 30$  мм. Такое ограничение размеров ширины  $\tau$  обусловлено конструкцией статора с распределенной обмоткой, хотя можно выполнить ротор с намного меньшей шириной.

Конструкция статора ВДПМ с зубцовым шагом позволяет выполнить ротор со значительно большим числом полюсов ротора и меньшей шириной  $\tau$ , поскольку в этих машинах ширина зубца статора и  $\tau$  примерно равны. В машинах с зубцовым шагом, как показано в работе [5], число полюсов ротора  $2p$  и число зубцов статора  $z$  должны находиться из соотношения  $2p = \Theta(mz_{\text{гр}} \pm 1)$ , где  $\Theta = 1, 2, 3, \dots$  — число повторяющихся частей статора, в каждой из которых число катушечных групп равно числу фаз  $m$ ;  $z_{\text{гр}} = 1, 2, 3$  — число катушек в катушечной группе.

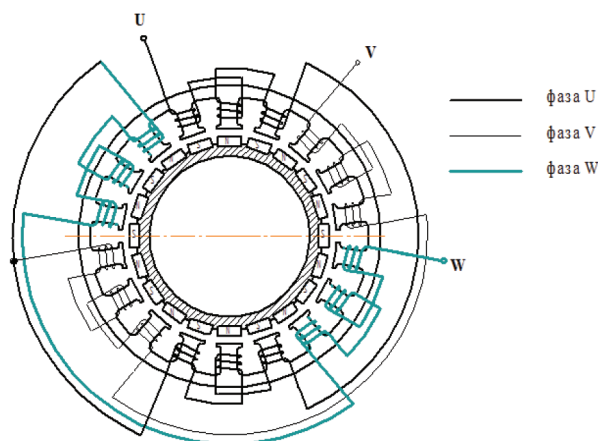


Схема ВДПМ

На рисунке приведена схема ВДПМ с зубцовым шагом, у которого  $z = 18$ ,  $\Theta = 2$ ,  $z_{\text{гр}} = 3$ ,  $p = 10$ ,  $m = 3$  и  $q = 0,3$ . Статор состоит из двух повторяющихся частей, в каждой из которых содержится по девять зубцов. В трехфазной обмотке статора, соединенной «звездой», каждая фаза расположена на трех соседних зубцах магнитопровода. Катушки фазы соединяются таким образом, чтобы полярность зубцов фазы чередовалась. Для сравнения габаритов и массы машин с разным исполнением статора выберем исходные параметры двигателя, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры для расчета габаритов и массы машины

| Обозначение | Наименование                            | Величина | Единица измерения |
|-------------|-----------------------------------------|----------|-------------------|
| $P$         | Номинальная мощность на валу            | 1000     | Вт                |
| $n$         | Номинальная частота вращения ротора     | 1000     | об/мин            |
| $U$         | Номинальное линейное напряжение питания | 105      | В                 |
| $m$         | Число фаз                               | 3        |                   |
| $\eta$      | Номинальный КПД                         | 0,9      |                   |

Таблица 1  
(Окончание)

|                |                                                                 |       |                   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|-------|-------------------|
| $\cos \varphi$ | Номинальный коэффициент мощности                                | 0,95  |                   |
| $A$            | Линейная нагрузка                                               | 20000 | А/м               |
| $B$            | Индукция в зазоре                                               | 0,75  | Тл                |
| $j$            | Плотность тока в проводнике фазы                                | 5     | А/мм <sup>2</sup> |
| $\alpha$       | Коэффициент полюсного перекрытия                                | 0,75  |                   |
| $D$            | Диаметр расточки статора                                        | 80    | мм                |
| $\delta$       | Длина воздушного зазора между ротором и магнитопроводом статора | 0,8   | мм                |

Разумеется, что  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ , а значит, и допустимые  $A$  и  $j$  у машин разного исполнения будут отличаться, но это отличие будет небольшим и при сравнении машин им можно пренебречь. Диаметр ротора будем считать равным диаметру расточки статора, поскольку их разница, составляющая 0,5 – 1 мм, на оценку массы и габаритов машины практически не повлияет. Также не будет учитываться увеличение потоков рассеяния магнитного поля ротора при увеличении числа пар полюсов и изменение обмоточного коэффициента, который у машин с зубцовым шагом, согласно данным источников [7], [9], зависит от схемы обмотки статора. Выберем минимальное зубцовое деление магнитопровода статора  $t_{z\min} = 10$  мм. Тогда минимальная ширина зубца  $t_{z\min} = 0,55t_z = 5,5$  мм. Этой величины достаточно, чтобы выдержать действующие на зубцы тангенциальные силы. Ширина паза  $b$  составит  $b = t_z - t_3 = 4,5$  мм. Максимальное число зубцов магнитопровода статора при заданном  $D = 80$  мм и выбранном  $t_{z\min}$  будет  $z_{\max} = \pi D / t_z = 25$ .

При полученном числе  $z_{\max}$  трехфазный ( $m = 3$ ) ВДПМ с распределенной обмоткой статора может быть выполнен в различных вариантах:

– первый вариант — число пар полюсов ротора  $p = 1$ ,  $m = 3$ ,  $q = 4$ , число зубцов магнитопровода статора  $z = 24$ ;

– второй вариант —  $p = 2$ ,  $q = 3$ ,  $z = 24$ .

Методика оценки массы ВДПМ для различных вариантов поясняется на примере расчета первого варианта машины согласно выражениям (1) – (21).

Длина активной части ротора  $l$  у синхронных машин разного исполнения при принятых исходных данных будет равна, согласно данным источника [10, с. 506],

$$l = \frac{6,1S}{\alpha \kappa_B \kappa_{об} ABD^2 n} = 0,096 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $S = P / \eta \cdot \cos \varphi = 1170 \text{ В} \cdot \text{А}$  — полная мощность;  $\kappa_B = 1,1$  — коэффициент формы поля;  $\kappa_{об}$  — обмоточный коэффициент, зависящий от схемы обмотки статора, в выражении (1) принят равным для всех вариантов,  $\kappa_{об} = 0,92$ .

Число пар полюсов оказывает влияние на массу и габариты магнитопровода ротора и статора, число витков и массу меди обмотки статора. При  $p = 1$  максимальный магнитный поток полюса ротора составит

$$\Phi_m = \frac{\pi D \alpha l B}{2p} = 0,0068 \text{ Вб}. \quad (2)$$

Ширина ярма статора  $b_c$  определяется допустимой индукцией  $B_c = 1,6 \text{ Тл}$  в ярме:

$$b_c = \frac{\Phi_m}{2lB_c} = \frac{\pi D \alpha l B}{4pB_c} = 0,02 \text{ м}. \quad (3)$$

В ярме ротора индукция магнитного поля знак не меняет, поэтому значение допустимой индукции в ярме ротора можно принять выше —  $B_p = 2,0$  Тл. Отсюда ширина  $b_p$  ярма ротора составит

$$b_p = \frac{\Phi_m}{2lB_p} = \frac{\pi D \alpha B}{4 p B_p} = 0,018 \text{ м.} \quad (4)$$

Фазное напряжение двигателя

$$U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}} = 60. \quad (5)$$

Ток фазы

$$I_\phi = \frac{S}{3U_\phi} = 6,5 \text{ А.} \quad (6)$$

Площадь поперечного сечения проводника фазы

$$S_{np} = I_\phi / j = 1,3 \text{ мм}^2. \quad (7)$$

На номинальной частоте вращения фазное напряжение и фазная ЭДС примерно равны:

$$U_\phi \approx E_\phi = \frac{\kappa_B \kappa_{об} w_\phi \Phi_m p \omega}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Отсюда

$$w_\phi = \frac{\sqrt{2} U_\phi}{\kappa_B \kappa_{об} \Phi_m p \omega} = 114 \text{ витка.} \quad (9)$$

Число активных проводников фазы

$$N_\phi = 2w_\phi = 228. \quad (10)$$

Проводники каждой фазы располагаются в восьми пазах, при этом можно определить высоту паза следующим образом:

$$h_n = \frac{N_\phi S_{np}}{8 \kappa_m b} = 26 \text{ мм,} \quad (11)$$

где  $\kappa_m = 0,3$  — коэффициент заполнения паза медью.

Теперь можно определить наружный диаметр магнитопровода статора,

$$D_n = D + 2h_n + 2b_c = 0,171 \text{ м.} \quad (12)$$

Масса ярма пакета магнитопровода статора составит

$$M_c = \gamma_c \kappa_c \frac{\pi}{4} l [D_n^2 - (D + 2h_n)^2] = 6,7 \text{ кг,} \quad (13)$$

где  $\kappa_c = 0,95$  — коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью;  $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$  — плотность стали.

Масса зубцов магнитопровода статора

$$M_z = \gamma_c \kappa_c z l t_3 h_n = 2,6 \text{ кг.} \quad (14)$$

Длина витка  $l_b$  обмотки статора примерно равна

$$l_b = 2l + 2 \cdot 1,3\pi D / 2p = 0,52 \text{ м,} \quad (15)$$

где длина лобовой части витка принята равной 1,3 ширины полюсного деления  $\tau = \pi D / 2p$ .

Масса меди статора

$$M_m = m \gamma_m S_{np} w_\phi l_b = 1,9 \text{ кг,} \quad (16)$$

где  $\gamma_m = 8300 \text{ кг/м}^3$  — плотность меди.

Общая масса статора составит

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{с}} + M_{\text{з}} + M_{\text{м}} = 11,2 \text{ кг.} \quad (17)$$

Выбираем для ротора схему ротора «звездочка» с радиальным направлением намагниченности постоянных магнитов. Для получения индукции в зазоре машины  $B = 0,75$  Тл достаточная длина постоянных магнитов составляет  $l_{\text{пм}} = 5$  мм, тогда масса постоянных магнитов составит

$$M_{\text{пм}} = \gamma_{\text{пм}} \alpha l \frac{\pi}{4} [(D - 2\delta)^2 - (D - 2\delta - 2l_{\text{пм}})^2] = 0,62 \text{ кг,} \quad (18)$$

где  $\gamma_{\text{пм}} = 7500 \text{ кг/м}^3$  — плотность материала постоянных магнитов.

Масса втулки ротора

$$M_{\text{вр}} = \gamma_{\text{с}} l \frac{\pi}{4} [(D - 2\delta - 2l_{\text{пм}})^2 - (D - 2\delta - 2l_{\text{пм}} - 2b_{\text{р}})^2] = 2,1 \text{ кг.} \quad (19)$$

Общая масса ротора будет равна

$$M_{\text{р}} = M_{\text{пм}} + M_{\text{вр}} = 2,72 \text{ кг;} \quad (20)$$

$$M = M_{\text{см}} + M_{\text{р}} = 13,9 \text{ кг.} \quad (21)$$

В табл. 2 приведены данные расчета габаритов и массы элементов ВДПМ разного исполнения, в том числе ВДПМ с зубцовыми обмотками статора при  $q = 0,3$ .

Таблица 2

Результаты расчета габаритов и массы нескольких вариантов исполнения машины

| Параметр        | Единица измерения | $p = 1, m = 3, q = 4, z = 24$ | $p = 2, m = 3, q = 2, z = 24$ | $p = 10, m = 3, q = 0,3, z = 18$ |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| $l$             | мм                | 96                            | 96                            | 96                               |
| $\Phi$          | Вб                | 0,0068                        | 0,0034                        | 0,0017                           |
| $b_{\text{с}}$  | мм                | 20                            | 9,8                           | 5                                |
| $b_{\text{р}}$  | мм                | 18                            | 8,8                           | 5                                |
| $w_{\text{ф}}$  | -                 | 114                           | 114                           | 114                              |
| $D_{\text{н}}$  | мм                | 171                           | 151                           | 142                              |
| $M_{\text{с}}$  | кг                | 6,7                           | 3,1                           | 1,53                             |
| $M_{\text{з}}$  | кг                | 2,6                           | 2,6                           | 2,6                              |
| $M_{\text{м}}$  | кг                | 1,9                           | 1,3                           | 0,82                             |
| $M_{\text{см}}$ | кг                | 11,2                          | 7,0                           | 4,95                             |
| $M_{\text{пм}}$ | кг                | 0,62                          | 0,62                          | 0,62                             |
| $M_{\text{вр}}$ | кг                | 2,1                           | 1,24                          | 0,75                             |
| $M_{\text{р}}$  | кг                | 2,72                          | 1,86                          | 1,37                             |
| $M$             | кг                | 13,92                         | 8,86                          | 6,28                             |

*Примечание.* В ВДПМ с зубцовыми обмотками ширина ярма магнитопровода статора  $b_{\text{с}}$  и ширина ярма ротора  $b_{\text{р}}$  при расчете по выражениям (3) и (4) получены менее 5 мм, но из условия механической прочности пакета статора и втулки ротора приняты равными 5 мм.

### Обсуждение полученных результатов

Приведенный расчет, из-за ряда допущений, имеет приближенный характер, однако наглядно показывает, что машины с зубцовым шагом обмотки статора имеют преимущество по габаритам и массе за счет уменьшения магнитного потока полюса и соответствующего сокращения ширины ярма магнитопровода статора и ротора. Кроме того, в машинах с зубцовым шагом обмотки сокращается длина лобовых частей витков обмотки статора, что также уменьшает массу машины.

### Выводы

1. Число полюсов ротора в ВДПМ с зубцовым шагом может быть существенно большим, чем в ВДПМ с распределенной обмоткой статора при одинаковом диаметре ротора.
2. ВДПМ с зубцовым шагом имеют меньшие габариты и массу за счет уменьшения ширины ярма магнитопровода статора и ротора, а также длины лобовых частей витков обмотки статора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М. В. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями / М. В. Баранов [и др.]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 240 с.
2. Chen A. Y. Performance comparisons among radial-flux, multistage axial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications / A. Y. Chen, R. Nilssenand, A. Nysveen // Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International. — IEEE, 2009. — Pp. 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
3. Калмыков А. Н. Вентильный электродвигатель с поперечным магнитным потоком и дисковым ротором / А. Н. Калмыков, А. А. Сеньков, А. П. Сеньков, // Электротехника. — 2016. — № 4. — С. 24–28.
4. Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. И. Лебедев, И. Е. Овчинников. — Л.: Наука (Ленинградское отд.), 1979. — 270 с.
5. Пат. 2047936 Российская Федерация, МПК H02K 21/00 (1995.01). Синхронный электродвигатель / В. Н. Бродовский, Е. С. Иванов, М. И. Лузин, В. П. Петухов, М. И. Пятков; заяв. Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики. — № 4001093/63; заявл. 02.01.1986; опубл. 10.11.1995.
6. Пат. 2059994 Российская Федерация, МПК H02K 19/12 (1995.01). Синхронный электродвигатель / А. Ф. Шевченко; заяв. и патентообл. Новосибирский государственный технический университет. — № 864037981; заявл. 17.03.1986; опубл. 10.05.1996.
7. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications / F. Meier. — Stockholm: KTH, 2008. — 165 p.
8. Бормотов А. В. Обмоточный коэффициент вентильных электродвигателей с зубцовыми, сосредоточенными обмотками статора / А. В. Бормотов, В. В. Николаев, Ю. Сан, А. П. Сеньков // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. — Самара, 2014. — Т. 2. — С. 72–75.
9. Сеньков А. П. Обмоточный коэффициент и потери в роторе вентильных электродвигателей с зубцовыми обмотками статора / А. П. Сеньков, А. В. Бормотов, Д. Ю. Седунов // Вестник Московского авиационного института. — 2015. — Т. 22. — № 3. — С. 122–131.
10. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2002. — 757 с.

### COMPARISON OF WEIGHT AND OVERALL DIMENSIONS OF BLDC MOTOR WITH DISTRIBUTED AND CONCENTRATED STATOR WINDINGS

*The article carried out a comparison of the weight and dimensions of the two types of brushless DC motors with permanent magnets on the rotor (PMM), which have different stator designs: with distributed and with a tooth pitch stator windings. It is shown that in machines with tooth pitch stator windings in the stator bore diameter, a predetermined number of pole pairs of the rotor can be significantly higher than in machines with distributed stator windings. Consequently, in step PMM with tooth pitch stator windings magnetic flux decreases, and decreases the required width of the magnetic yoke of the stator and rotor. As a result, weight and dimensions of magnetic conductor of the stator and rotor in PMM with tooth pitch stator windings are less. In addition, coils of PMM with tooth pitch stator windings have a length of less than coils of PMM with distributed windings of the stator, which also reduces the weight and dimensions of the stator winding.*

*Keywords: brushless permanent magnet dc motor, permanent magnets, dimensions and weight, concentrated windings, distributed stator windings.*

## REFERENCES

1. Baranov, M. V., et al. *Jelektricheskie sledjashhie privody s momentnym upravleniem ispolnitelnymi dvigateljami*. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 2006.
2. Chen, Anyuan, Robert Nilssen, and Arne Nysveen. "Performance comparisons among radial flux, multi-stage axial flux and three-phase transverse flux PM machines for downhole applications." *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*. IEEE, 2009: 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
3. Kalmykov, A. N., A. A. Sen'kov, A. P. Sen'kov, and A. A. Rjabov. "Ventilnyj jeлектродвигатель s poperechnym magnitnym potokom i diskovym rotorom." *Russian Electrical Engineering* 4 (2016): 24–28.
4. Lebedev, N. I., and I. E. Ovchinnikov. *Beskontaktnye dvigateli postojannogo toka*. L.: Nauka, leningradskoe otdelenie, 1979.
5. Brodovskij, V. N., E. S. Ivanov, M. I. Luzin, V. P. Petuhov, and M. I. Pjatkov. *Sinhronnyj jeлектродвигатель*. Russian Federation, assignee. Patent 2047936. 10 Nov. 1995.
6. Shevchenko, A. F. *Sinhronnyj jeлектродвигатель*. Russian Federation, assignee. Patent 2059994. 10 May 1996.
7. Meier, F. *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*. Stockholm: KTH, 2008.
8. Bormotov, A. V., V. V. Nikolaev, Ju. San, and A. P. Sen'kov. "Obmotochnyj koeficient ventilnyh jeлектродвигателей s zubcovymi, sosredotochennymi obmotkami statora." *Trudy VIII mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jeлектроприводу AJeP-2014*. Saransk, 2014. Vol. 2. 72–75.
9. Sen'kov, A. P., A. V. Bormotov, and D. Ju. Sedunov. "Winding coefficient and rotor losses in servo motors with stator tooth concentrated windings." *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* 22.3 (2015): 122–131.
10. Kopylov, I. P. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin*. M.: «Vysshaja shkola», 2002.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сан Ю — аспирант.  
Научный руководитель:  
Сеньков Алексей Петрович.  
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»  
kws@smtu.ru  
Сеньков Алексей Петрович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»  
senkov@smtu.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Thsan Yu — postgraduate.  
Supervisor:  
Sen'kov Aleksey Petrovich.  
St Petersburg State Marine Technical University  
kws@smtu.ru  
Sen'kov Aleksey Petrovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
St Petersburg State Marine Technical University  
senkov@smtu.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2016 года

УДК 621.311.1

**А. Б. Каракаев,  
А. В. Луканин**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕМ ГЛУБИНЫ КОНТРОЛЯ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные показатели контролепригодности, относящиеся к надежности, контролю работоспособности и поиска дефектов в элементах судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Обоснованы и сформулированы основные задачи синтеза контролепригодности с учетом ограничений конструктивно-технологического характера и массогабаритных особенностей по минимуму точек контроля, а также рациональному размещению компонентов объекта в конструктивных блоках, среднее количество которых определяется точностью глубины контроля, позволяющей анализировать правильность функционирования, работоспособность, а следовательно, и место обнаружения объекта.

*Сформулирована и решена задача анализа контролепригодности электрооборудования при размещении функциональных компонентов в конструктивных блоках при заданной совокупности точек контроля для выбора эффективных процедур оценки технического состояния и поиска обнаруженных дефектов. Приводятся способы диагностирования СЭЭС для предотвращения возможных сбоев в их работе, связанных с неисправностями электрооборудования. Изложены факторы, оказывающие влияние на быстроту восстановления работоспособности электрических сетей. Обоснована необходимость создания и развития теоретических положений контролепригодности СЭЭС как необходимой предпосылки для разработки общей теории их безопасности и диагностирования.*

*Ключевые слова:* судовая электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность, коэффициент глубины контроля, коэффициент готовности.

### Введение

Анализ содержания различных показателей контролепригодности (КП) элементов судовой электроэнергетической системы (СЭЭС), изложенный в работах [1], [2], позволяет выдвинуть в качестве основного показателя КП, в наибольшей степени взаимосвязанного с показателями надежности, показатель глубины контроля работоспособности и поиска обнаруженных дефектов. В качестве меры глубины контроля удобно рассматривать среднее число блоков, с точностью до которых ангилируется правильность функционирования, работоспособность, а, следовательно, и место обнаруживаемого дефекта. Если  $n$  — число блоков в объекте контроля;  $n_r$  — число  $r$ -различимых столбцов матрицы проверок  $B_z$  [3], то  $r$  и есть глубина контроля;  $r$  может изменяться от 1 до  $n$ :  $1 \leq r \leq n$ , определяя своим конкретным значением число возможных классов различимости дефектов:  $k \leq n$ . Поскольку общее число блоков, подвергающихся контролю, а, следовательно, и возможное число дефектов в объекте контроля равно  $\sum_{r=1}^k r n_r$  ( $r$  — число блоков), коэффициент  $K_{ГК} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^k r n_r$  является наиболее информативным показателем глубины контроля работоспособности и поиска дефектов.

Очевидно, если система точек контроля выбрана таким образом, что достигается однозначность вывода о работоспособности каждого блока и идентификации в нем дефекта, то  $K_{ГК} = 1$ . Если система контрольных точек сведена к контролю только одного входа и одного выхода (возможно заключение лишь о работоспособности или неработоспособности объекта контроля без какой-либо информации, обеспечивающей локализацию места возникновения дефекта в одном или нескольких блоках), то, очевидно, в этом случае  $K_{ГК} = n$ . Таким образом,  $1 \leq K_{ГК} \leq n$ .

Из работы [4] известно, что к числу показателей надежности восстанавливаемых объектов относятся единичные показатели таких ее свойств, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость, а также комплексный показатель — коэффициент готовности, характеризующий вероятность заставить объект в работоспособном состоянии в течение определенного периода эксплуатации. Общеизвестно, что этот комплексный показатель надежности — коэффициент готовности — представляет собой отношение среднего времени использования по прямому назначению  $T_{и}$  к общему времени эксплуатации, включающему среднее время использования и среднее время восстановления работоспособности  $T_{в}$ , т. е.  $K_{г} = \frac{T_{и}}{(T_{и} + T_{в})}$ .

Как показывает анализ опыта эксплуатации сложных электросхем и электрооборудования СЭЭС, рассмотренный в работах [5] — [8], существенную долю временных затрат при восстановлении составляет не столько время проведения ремонтных операций, сколько (до 60 — 80 %) время проведения операции контроля работоспособности и поиска дефекта с глубиной до определенного числа блоков. Если представить  $T_{в}$  в виде суммы среднего времени контроля работоспособности и поиска дефекта  $T_{п}$  и среднего времени ремонта —  $T_{р}$ :  $T_{в} = T_{п} + T_{р}$ , то очевидно, что основная взаимосвязь уровня КП и надежности объекта контроля (особенно для сложных multifunctional-

ных электросхем автоматизированных электроприводов, систем ДАУ и т. д.) заключается в установлении зависимости между средним временем контроля и поиска дефекта  $T_{\text{п}}$  и коэффициентом глубины  $K_{\text{ГК}}$ . Чем сложнее объект контроля по своей структуре, а также функциональным и конструктивно-технологическим связям, тем больших затрат требует обеспечение высокого уровня контролепригодности. В этой связи при принятии проектных схемно-конструкторских решений по объекту контроля, а, следовательно, и по уровню  $K_{\text{р}}$ , возникает задача их сравнения по уровню КП. Значит, всегда можно выбрать какое-то базовое значение  $K_{\text{ГК}}^0$ , при котором временные затраты на контроль составляют  $t_0$ . При принятии новых конструктивно-схемных проектных решений коэффициент глубины контроля  $K_{\text{ГК}}$  будет принимать значения, отличные от  $K_{\text{ГК}}^0$ .

### Основная часть

Безусловно, разработка эффективной процедуры генерирования новых проектных решений и избежание при этом поиска рациональных по КП и надежности решений методом перебора в общетеоретическом плане представляет собой трудноразрешимую задачу. В этой связи можно воспользоваться подходом, изложенным в работах [5], [9], [10], где опытным путем доказывается эвристическое соотношение

$$\frac{T_{\text{п}}}{t_0} = \left( \frac{K_{\text{ГК}}^0}{K_{\text{ГК}}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  — показатель конструктивно-схемной сложности объекта контроля.

Действительно, чем меньше  $K_{\text{ГК}}$ , чем больше различимость дефектов и тем меньше  $T_{\text{п}}$ . Приведенное соотношение удобно также тем, что с помощью формулы

$$\alpha = \frac{\ln \left( \frac{T_{\text{п}}}{T_0} \right)}{\ln \left( \frac{K_{\text{ГК}}^0}{K_{\text{ГК}}} \right)} \quad (2)$$

удается опытным путем или статистическим моделированием с достаточной доверительной вероятностью установить значение коэффициента сложности объекта контроля  $\alpha$ . Для устранения методических трудностей при оценке  $K_{\text{ГК}}^0$  и  $t_0$  целесообразно их рассматривать при исходной системе точек контроля, включающих только входы и выходы объекта контроля с учетом его назначения и конструктивных особенностей.

Следует отметить, что не только временные затраты на контроль работоспособности и поиск дефекта с учетом достигнутой меры глубины контроля оказывают влияние на надежность объекта контроля, но и время ремонта при успешной идентификации обнаруженного дефекта, особенно для высокоавтоматизированных СЭЭС современных судов, когда в составе ремонтных операций преобладают операции замены кассет, элементов конструкции, а не операций восстановительного характера. Таким образом, можно выделить в общем времени ремонта временные затраты на замену блоков и кассет  $t_3$  и среднее время проверки работоспособности после каждой замены  $\tau$  до тех пор, пока не будет найдена неисправная среди общего числа «подозреваемых» элементов в соответствии с принятой глубиной контроля  $K_{\text{ГК}}$ . Если дефект различим до каждого блока, т. е.  $K_{\text{ГК}} = 1$ , то, очевидно,  $T_{\text{р}} = t_3 + \tau$ . Если дефект выявлен до  $l$  блоков, т. е.  $K_{\text{ГК}} = l$ , то  $\tau$  увеличивается.

Опыт показывает, что рациональной стратегией поиска неисправного блока среди «подозреваемых» является последовательное половинное разбиение множества включенных в анализ работоспособности блоков в соответствии с достигнутой глубиной контроля. Тогда можно признать справедливым соотношение

$$T_{\text{р}} = \frac{1}{2}(t_3 + \tau)(K_{\text{ГК}} + 1). \quad (3)$$

Таким образом, в общем виде зависимость среднего времени восстановления  $T_{\text{в}}$  от глубины контроля будет следующей:

$$T_b = t_0 \left( \frac{K_{ГК}^0}{K_{ГК}} \right)^\alpha + \frac{1}{2} (t_3 + \tau) (K_{ГК} + 1). \quad (4)$$

Если учесть, что  $K_{ГК}$  характеризует число блоков, с точностью до которых идентифицируется дефект, то величина, обратная этому коэффициенту, будет отражать интенсивность восстановления, определяемую глубиной контроля. Обозначим  $\frac{1}{K_{ГК}} = \xi_{ГК}$  и  $\frac{1}{K_{ГК}^0} = \xi_{ГК}^0$ . В этом случае зависимость времени восстановления  $T_b$  от показателей глубины контроля можно представить в следующем виде:

$$T_b = t_0 \gamma'_k + (t_3 + \tau) \gamma''_k, \quad (5)$$

где  $\gamma'_k = \left( \frac{k_{ГК}}{k_{ГК}^0} \right)^\alpha$  и  $\gamma''_k = \frac{1}{2} \frac{k_{ГК+1}}{k_{ГК}}$ .

Эта зависимость наглядно характеризует влияние коэффициента глубины контроля на основную составляющую коэффициента готовности, поскольку  $\gamma'_k$  и  $T_b$  являются, по существу, корректирующими коэффициентами. Так как  $\gamma'_k < 1$  и  $\gamma''_k < 1$ , время восстановления уменьшается с уменьшением коэффициента глубины контроля.

Результаты, полученные в научных трудах [11] – [14], позволяют сделать вывод о том, что установившиеся значение коэффициента готовности и коэффициента простоя можно выразить через интенсивность отказа  $\lambda$ , интенсивность поиска дефектов  $\mu_n$  и интенсивность ремонта  $\mu_p$  в предположении, что функция распределения времени безотказной работы и функция распределения времени поиска дефекта и ремонта подчинены экспоненциальному закону:

$$K_{Г} = \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p + \lambda (\mu_n + \mu_p)}; \quad K_{п} = 1 - \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p + \lambda (\mu_n + \mu_p)}. \quad (6)$$

В окончательном виде зависимость  $K_{Г}$  и  $K_{п}$  от  $K_{ГК}$  можно записать в следующем виде:

$$K_{Г} = \frac{2K_{ГК}^\alpha}{2K_{ГК}^\alpha + \lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}; \quad K_{п} = \frac{\lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}{2K_{ГК}^\alpha + \lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}. \quad (7)$$

Вычисление производной  $\frac{\gamma K_{Г}}{\gamma K_{ГК}}$  и приравнивание ее нулю дает выражение для расчета оптимального значения  $K_{ГК}^{опт}$  в виде

$$K_{ГК}^{опт} = \left[ \frac{2\alpha t_0 (K_{ГК}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}. \quad (8)$$

В общем случае «выигрыш» в надежности можно оценить по отношению

$$\delta = \frac{K_{п}}{K_{п}^0},$$

где  $K_{п}$  — коэффициент простоя с улучшенной контролепригодностью;  $K_{п}^0$  — базовое значение коэффициента простоя.

Качественно зависимости  $T_b$ ,  $T_{п}$ ,  $T_p$  от  $K_{ГК}$  показаны на рис. 1.

С учетом ранее приведенных формул оптимальное значение коэффициента готовности можно рассчитать по следующей зависимости:

$$K_{Г.ОПТ} = \frac{2\alpha}{2\alpha + \lambda(t_3 + \tau) \left[ \alpha \left( \frac{2\alpha t_0 (K_{ГК}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} + 1 \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} + \left( \frac{2\alpha t_0 (K_{ГК}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \right]}$$

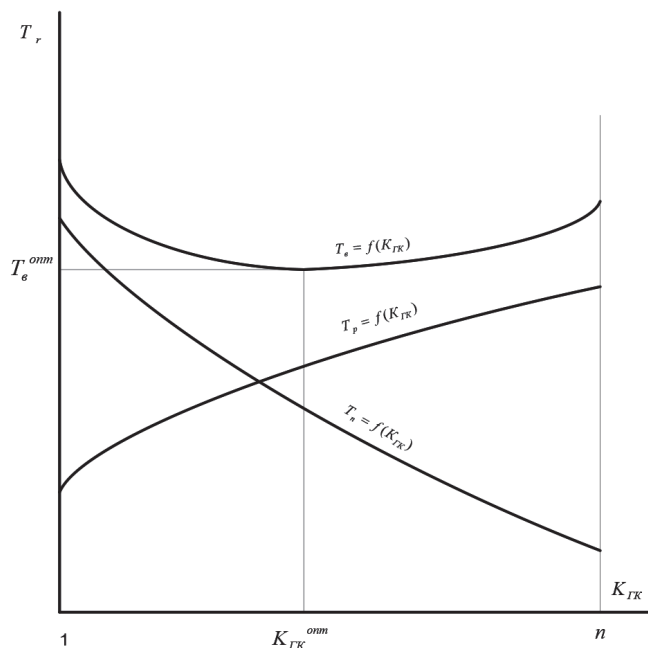


Рис. 1. Зависимости коэффициента глубины контроля  $K_{ГК}$  от времени ремонта  $T_p$ , времени поиска дефекта  $T_{\Pi}$  и времени восстановления  $T_B$

На рис. 2 показаны зависимости  $K_{ГК}$  от объекта контроля  $\alpha$ , анализ которых показывает, что существуют такие значения  $\alpha$ , когда исходный коэффициент готовности становится равным оптимальному, т. е.  $K_{ГК}^0 = K_{ГК}^{ОПТ}$ . Это означает, что повысить надежность объекта контроля за счет изменения глубины контроля не удастся при заданном значении  $\alpha$ , которое можно считать критическим.

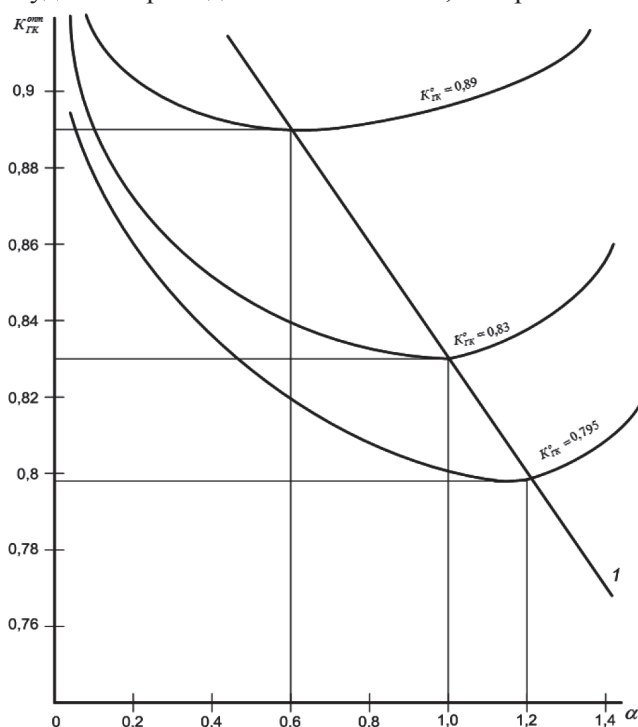


Рис. 2. Зависимости коэффициента глубины контроля  $K_{ГК}$  от показателя сложности объекта контроля  $\alpha$

## Решение уравнения

$$K_{ГК} = \left[ \frac{2\alpha_{кр} t_0 (K_{ГК}^0)^{\alpha_{кр}}}{t_3 + \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha_{кр} + 1}} \quad (9)$$

позволяет оценить значение  $\alpha_{кр}$  по следующей формуле:  $\alpha_{кр} = K_{ГК}^0 (t_3 + \tau) / 2t_0$ .

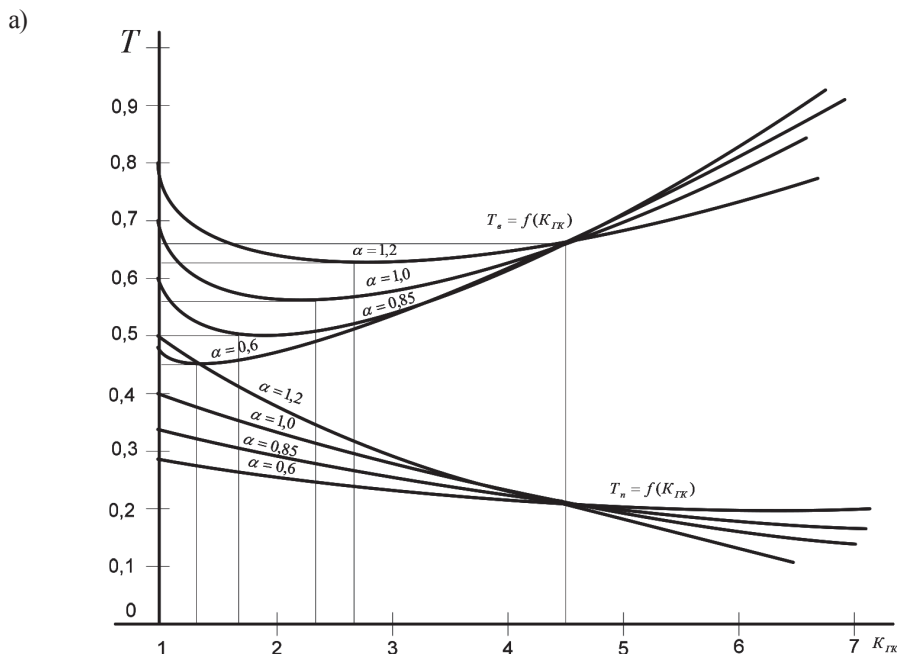
Если  $\alpha \neq \alpha_{кр}$ , то графики на рис. 2 определяют основные направления повышения коэффициента готовности за счет изменения коэффициента сложности  $\alpha$ . Из графиков, приведенных на рис. 2 нетрудно заметить, что прямая 1 разделяет всю область решений на две части. Очевидно, в области, соответствующей  $\alpha < \alpha_{кр}$ , оптимальное значение коэффициента глубины контроля меньше исходного. Следовательно, коэффициент готовности можно повысить введением дополнительных точек контроля. Соотношению  $\alpha > \alpha_{кр}$  будет соответствовать соотношение  $K_{ГК}^{ОПТ} > K_{ГК}^0$ . Значит, исходное множество точек контроля можно уменьшить без ущерба для эффективности оценки работоспособности и поиске дефекта.

На основании ранее изложенного можно выявить следующие параметры, определяющие взаимосвязь надежности и уровня контролепригодности электрооборудования:

- среднее время восстановления —  $T_v$ ;
- коэффициент готовности —  $K_r$ ;
- параметр сложности объекта контроля —  $\alpha$ ;
- среднее время оценки работоспособности и поиска дефекта при исходной системе точек контроля (обычно точек контроля вход-выход) —  $t_0$ ;
- коэффициент глубины контроля при исходной системе точек контроля —  $K_{ГК}^0$ ;
- коэффициент простоя —  $K_n$ .

Взаимосвязь рассмотренных параметров на первом этапе анализа определяется формулами, которые позволяют построить необходимые зависимости при различных значениях параметров, обеспечивающих эффективный синтез заданного уровня КП.

Наиболее существенными для решения задач синтеза КП очевидно будут зависимости  $T_v$  от  $K_{ГК}$  и  $K_n$  от  $K_{ГК}$ . Нетрудно установить, что при уменьшении параметра  $\alpha$  (рис. 3, а) и связанного с этим уменьшении времени поиска дефекта  $T_n$  уменьшается и оптимальное значение глубины контроля. При этом предполагается, что параметр  $\alpha$  не оказывает влияние на значения исходного времени восстановления и времени ремонта.



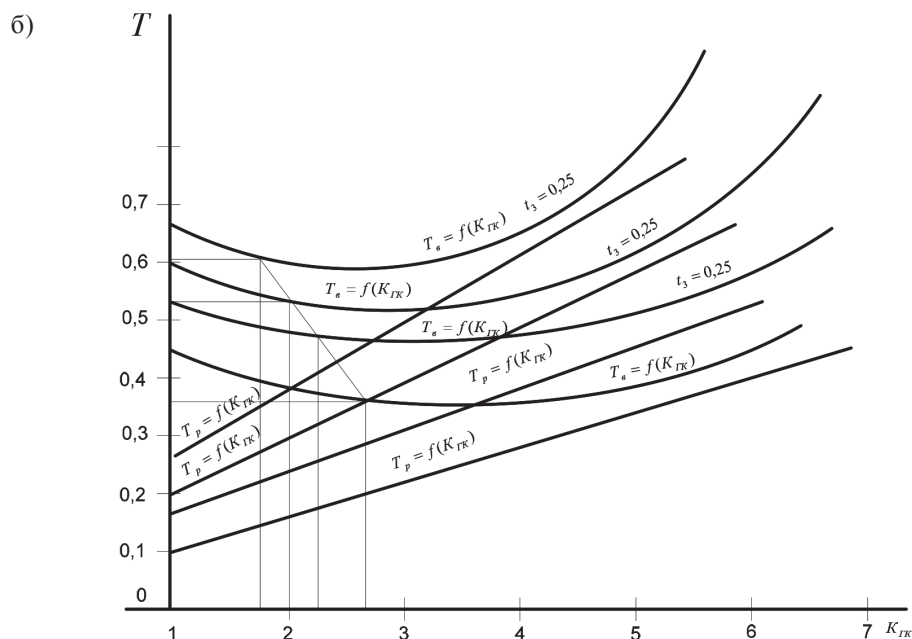


Рис. 3. Зависимости времени восстановления  $T$  и времени поиска дефектов  $T_n$  от коэффициента глубины контроля  $K_{ГК}$  для различных значений параметра сложности объекта контроля  $\alpha$  (а) и различных параметрах замены времени  $t_3$  (б)

Если удастся сохранить время замены конструктивного блока, кассеты и элемента объекта контроля (рис. 3, б), то даже при постоянном времени поиска дефекта  $T_n$  это приведет к уменьшению времени ремонта  $T_p$ , а, следовательно, и к уменьшению оптимального времени восстановления. Тогда оптимальное значение глубины контроля будет увеличиваться. К таким же выводам можно прийти, если анализировать влияние уменьшения времени проверок  $\tau$  в процессе замен блоков. Увеличить оптимальное значение глубины контроля удастся также за счёт уменьшения базового значения  $K_{ГК}^0$ . Очевидно, и оптимальное время восстановления в этом случае также уменьшится за счёт изменения времени поиска дефекта  $T_n$ .

Точно так же уменьшение исходного (базового) значения времени  $t_0$  (рис. 4) позволяет увеличить оптимальное значение глубины контроля.

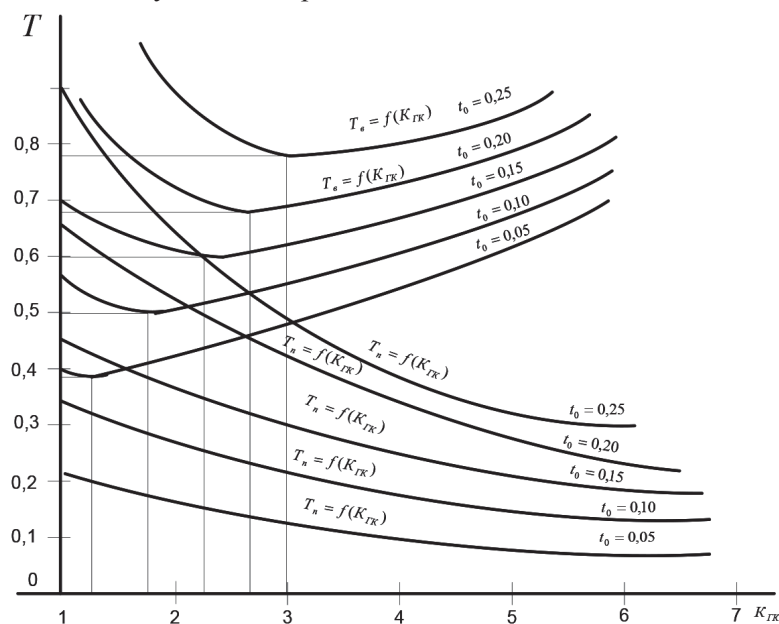


Рис. 4. Зависимости времени восстановления  $T$  и времени поиска дефектов  $T_n$  от коэффициента глубины контроля  $K_{ГК}$  при различных исходных значениях базового времени  $t_0$

### Обсуждение основных результатов

Итак, для решения задач синтеза по надежности заданного уровня КП необходимо, в первую очередь, оптимизировать глубину контроля путем анализа соотношений между параметрами объекта.

Рассмотрение приведенных ранее формул (7) – (9) позволяет выделить следующие важнейшие соотношения, характеризующие исходную конструктивно-технологическую приспособленность объекта к операциям оценки работоспособности и восстановления методом замен:

$$\beta = \frac{2\alpha t_0}{t_3 + \tau}; \quad \delta = \frac{1}{(K_{ГК}^0)^\alpha}. \quad (10)$$

Если  $\beta = K_{ГК}^0$ , то это значит, что объект контроля спроектирован так, что повысить его надежность (коэффициент готовности) за счёт изменения глубины контроля не удастся. Если  $\delta < \beta < K_{ГК}^0$ , то повысить  $K_{ГК}$  можно лишь за счёт уменьшения исходной глубины контроля  $K_{ГК}^0$  до значения  $K_{ГК}^{опт}$  организацией дополнительных точек контроля (рис. 5).

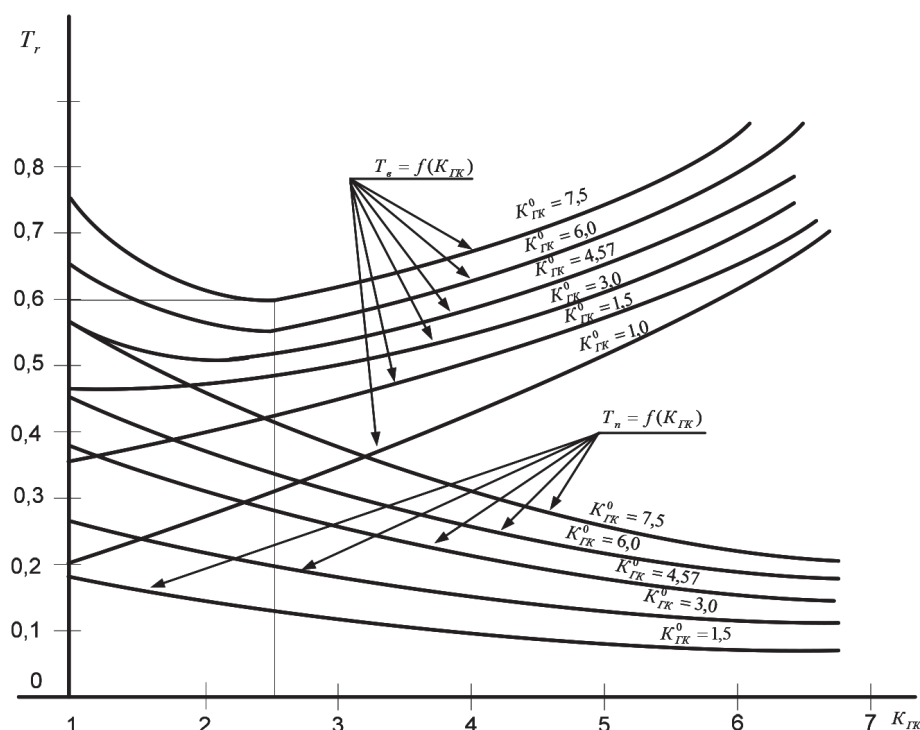


Рис. 5. Зависимости времени восстановления  $T_v$  от коэффициента глубины контроля  $K_{ГК}$  при различных значениях исходной системы точек контроля  $K_{ГК}^0$

Совершенно очевидно, если уровень КП обеспечивает одноразличимость дефектов в объекте контроля (рис. 6), т. е.  $K_{ГК}^{опт} = 1$ , то  $K_{ГК}$  будет иметь максимальное значение, что соответствует соотношению  $\beta \leq \delta$ .

При избыточном числе точек контроля значение оптимальной глубины контроля находится в пределах  $K_{ГК}^0 < K_{ГК}^{опт} < n$ , где  $n$  — число блоков в объекте контроля. Нетрудно показать, что стратегия, связанная с уменьшением избыточного числа точек контроля, определяется соотношением

$$K_{ГК}^0 < \beta < \frac{n^{\alpha+1}}{(K_{ГК}^0)^\alpha}. \quad (11)$$

Таким образом, анализ соотношений параметров КП объекта контроля и его надежности (коэффициентов готовности и простоя) позволяет выбрать стратегии дополнительной организации точек контроля, решения задачи одноразличимости дефектов или уменьшения числа точек контроля.

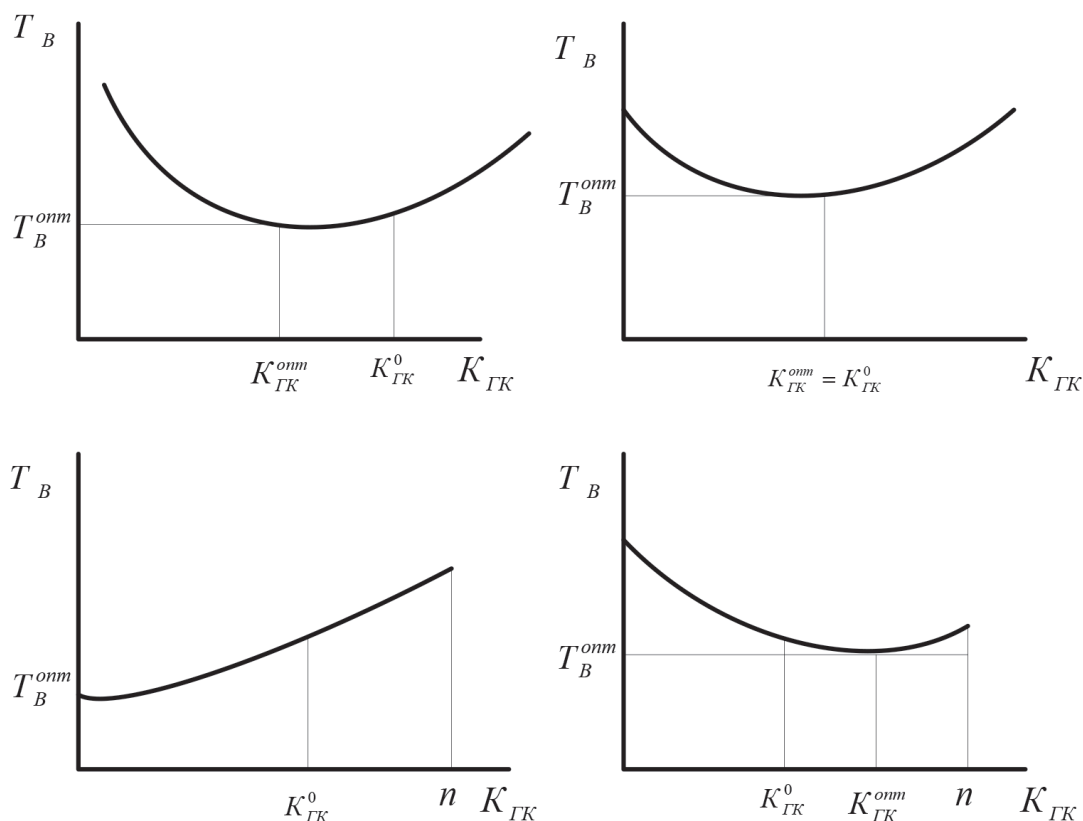


Рис. 6. Зависимости, иллюстрирующие различные стратегии дополнительной организации точек контроля, решения задачи одноразличности дефектов или уменьшения точек контроля

В качестве примера выбора стратегии повышения уровня КП по показателям надежности рассмотрим граф-модель системы автоматического распределения активных нагрузок, представленную на рис. 7. Пусть ставится задача уменьшения коэффициента простоя:  $K_n = \frac{1}{1 + \lambda T_B}$  в предположении, что система автоматического распределения активных нагрузок относится к высоконадежным системам с исходным значением коэффициента простоя:  $K_n^0 = 1,25 \cdot 10^{-3}$ .

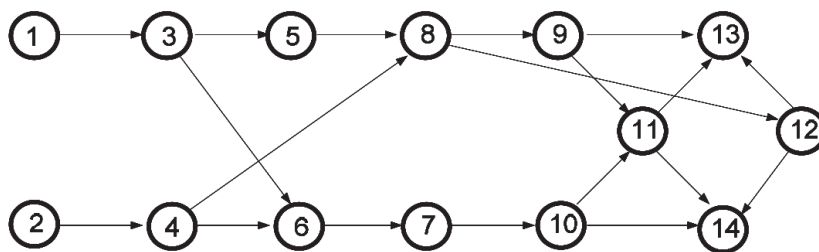


Рис. 7. Граф-модель системы автоматического распределения активных нагрузок при параллельной работе двух генераторных агрегатов

Пусть параметры схемы автоматического распределения активных нагрузок имеют следующие значения:  $t_0 = 0,2$  ч;  $t_3 = 0,25$  ч;  $\tau = 0,1$  ч;  $\alpha = 0,85$ ;  $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$  1/ч. При этих параметрах для вычисления среднего времени восстановления по формуле  $T_B = t_0 + \frac{K_{ГК}^0 + 1}{2}(t_3 + \tau)$  необходимо вычислить  $K_{ГК}^0$ . Полагая, что исходная система контрольных точек выбрана по сигналам вход-выход вершин 1, 2, 13, 14, матрицу проверок можно представить в виде:

$$\tilde{B}^* =$$

|            | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| $b(1, 13)$ | 1 |   | 1 |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 1  | 1  |    |
| $b(2, 13)$ |   | 1 |   | 1 |   | 1 | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 1  | 1  |    |
| $b(1, 14)$ | 1 |   | 1 |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 1  |    | 1  |
| $b(2, 14)$ |   | 1 |   | 1 |   | 1 | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 1  |    | 1  |

Нетрудно по  $B_z$  установить, что  $D_1 = \{1, 3, 5\}$ ,  $D_2 = \{2, 4\}$ ,  $D_3 = \{6, 7, 8, 9, 11, 12\}$  образуют классы эквивалентности дефектов.

Таким образом, исходная глубина диагностирования равна

$$K_{ГК}^0 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^K m_r = 1 \cdot \frac{2}{14} + 2 \cdot \frac{2}{14} + 3 \cdot \frac{3}{14} + 7 \cdot \frac{7}{14} = 4,57.$$

Значения оптимального коэффициента глубины контроля

$$K_{ГК}^{опт} = \left( \frac{2 \cdot 0,85 \cdot 0,2 \cdot 4,57^{0,85}}{0,25 + 0,1} \right)^{\frac{1}{1,85}} = 1,04 \cdot 10^{-3}.$$

Если реализовать дополнительные контрольные точки на выходах блоков 10 и 12, то расчеты показывают, что при этом достигается глубина контроля.

### Заключение

Основой математической модели контролепригодности СЭЭС как объекта контроля является логическая модель функционирования, включающая блоки, определяющие уровень структурной декомпозиции, и вход-выходные связи, характеризующиеся одним или несколькими параметрами функционирования блоков.

Наиболее рациональной моделью для анализа контролепригодности СЭЭС и её элементов является упорядоченный ориентированный граф  $G(V, U)$ , множеству вершин которого  $V$  соответствуют блоки логической модели, а дуги  $U$  отражают функциональные взаимосвязи между блоками объекта контроля. Граф  $G(V, U)$  позволяет строить матрицы достижимости и проверок, используемые в дальнейшем для анализа и синтеза необходимого уровня контролепригодности объекта контроля.

Введение понятия *кратность дефекта* позволяет формировать процедуры и алгоритмы оценки уровня контролепригодности с помощью коэффициента глубины контроля. На основе анализа матрицы проверок  $B_z$  разработана эффективная процедура поиска одиночных дефектов, а также определены основные принципы и этапы построения алгоритма поиска дефектов произвольной кратности. Работоспособность алгоритмов проиллюстрирована конкретными расчётами по оценке уровня контролепригодности релейно-контакторных электросхем и электрических сетей СЭЭС.

Анализ конструктивных особенностей судового электрооборудования и процессов его функционирования позволяет сделать вывод о том, что для оценки и анализа КП целесообразно комплексное использование методов выбора рациональной системы контрольных точек и управляемых разрывов электрических коммуникаций с целью обеспечения высокого уровня различимости дефектов произвольной кратности.

Обоснованы и сформулированы основные задачи синтеза КП с учетом ограничений конструктивно-технологического характера и массогабаритных особенностей по минимуму точек контроля, рациональному размещению компонентов объекта в конструктивных блоках, с точностью до которых осуществляется контроль технического состояния, а также с учетом стоимости ввода дополнительных точек съема контрольно-диагностической информации.

Разработана методическая база синтеза конструктивных единиц-блоков объекта контроля при минимальном множестве точек контроля на основе граф-модели объекта контроля, формирования и анализа матриц проверок с помощью специальных процедур выбора и компоновки точек контроля. Сформулирована и решена задача анализа контролепригодности электрооборудования при размещении функциональных компонентов в конструктивных блоках на заданной совокупности точек контроля для выбора эффективных процедур оценки технического состояния и поиска обнаруженных дефектов.

Уделено существенное внимание методическим аспектам вероятностного анализа контролепригодности СЭЭС в интересах оценки эффективности ее функционирования в двух аспектах: вещественно-энергетическом и структурно-функциональном для прогноза структурных и режимных нарушений. При сформулированном методическом подходе предложено выделить две составляющие КП СЭЭС в целом: структурно-функциональную КП и режимную КП. Несмотря на определенную условность такой декомпозиции КП СЭЭС, это позволяет определить в качестве перспективных вероятностный анализ данных составляющих КП СЭЭС, обоснование эффективных приемов декомпозиции сложных структур, способов выделения в сложной многоэлементной схеме одно- и двухэлементных сечений. В конечном итоге, это обеспечивает расчет вероятности отказа системы относительно нагрузки системы и определения коэффициента относительной потери мощности как показателя режимно-функциональной КП СЭЭС.

В основе анализа вероятностных моделей СЭЭС и ее активных параметров для анализа режимно-функциональной КП СЭЭС целесообразно использовать интегральные вероятностные характеристики режимов и по ним определять параметры законов распределения, вид которых устанавливается по результатам анализа физического существа исследуемых процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данцевич И. М. Обеспечение контролепригодности электрических сетей, схем и электрооборудования судовых электроэнергетических систем на основе управляемых разрывов функциональных сигналов / И. М. Данцевич, А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 45–54.
2. Каракаев А. Б. Методические вопросы синтеза контролепригодности размещения компонентов объекта в конструктивных единицах ограниченного объема по минимуму точек контроля / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 44–48.
3. Каракаев А. Б. Теоретические основы анализа контролепригодности судовой электроэнергетической системы и ее элементов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 54–58.
4. Литвинов В. В. Методы построения имитационных систем / В. В. Литвинов, Т. П. Марьянович. — Киев: Наукова думка, 1991. — 120 с.
5. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. — М.: Наука, 1982. — 286 с.
6. Дудник Б. Я. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник, В. Ф. Овчаренко, В. К. Орлов [и др.]. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
7. Гнедусо Б. В. Надежность и эффективность в технике: справочник / Б. В. Гнедусо. — М.: Машиностроение, 1987. — 280 с.
8. Герман Г. В. Надежность судовых электроэнергетических систем и систем судовой автоматики / Г. В. Герман, Ю. Н. Киреев, Е. А. Мельницкая. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 92 с.
9. Проников А. С. Надежность машин / А. С. Проников. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
10. Дедков В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Б. С. Северцев. — М.: Высш. шк., 1976. — 406 с.
11. Цикарев В. Е. Модели надежности и эффективности систем / В. Е. Цикарев. — Киев: Наукова думка, 1989. — 124 с.

12. Зеленцов В. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи / В. А. Зеленцов, А. А. Гагин. — М.: Изд-во МО СССР, 1991. — 170 с.

13. Власов А. Б. Оценка показателей надежности корабельного электрооборудования, их влияние на безопасность мореплавания и вероятность страховых рисков / А. Б. Власов, С. А. Буев // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 672–680.

14. Головкин С. В. Алгоритмическое обеспечение судовых систем управления с упреждающей диагностикой отказов / С. В. Головкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 28–31.

## INVESTIGATION MAIN DEPENDENCES BETWEEN INDICATORS OF RELIABILITY AND INDICATOR OF SHIP ELECTROEQUIPMENT CONTROL DEPTH

*There are considered basic controllability indicators, related to a reliability, operability control and defects searching in the ship power system (SPS) in the article. There are justified and formulated basic controllability synthesis goals, taking in account constructional limitation and mass-and-overall features, with minimum control points, object components rational placement in constructional blocks (the technical control is being realized with accuracy to the them), the average number of which is determined by the precision depth control that allows you to analyze the correct functioning, performance, and hence position detection of the object. There is formulated and solved a task of elector equipment controllability analysis at functional components placement in constructional blocks at defined control points set for a chosen of technical condition assessment effective procedures and a discovered defects search. In the article there are given ways of ship electrical power systems diagnosis (troubleshooting) to prevent possible operation failures in the systems, related to electrical equipment malfunction. There are given ways of ship electrical power systems diagnosis (troubleshooting) to prevent possible operation failures in the systems, related to electrical equipment malfunction. There are given factors which affects restoration speed of electrical grids functionality. There is proved a need of creation and development of theoretical regulations of electrical power system controllability as a required precondition for common theory of modern ship electrical power system safety.*

*Keywords: Ship electrical power system, electrical equipment, controllability, control depth factor, readiness factor.*

## REFERENCES

1. Dancevich, I. M., A. B. Karakaev, and A. V. Lukanin. “Controllability ensuring of electrical grids, schemes and equipment of ship electrical power systems on basis of under-control breakings of functional signals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 45–54.

2. Karakaev, A. B., and A. V. Lukanin. “Methodical questions of controllability synthesis in terms of object components placement in limited volume constructive units by control points minimum.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 44–48.

3. Karakaev, A. B., and A. V. Lukanin. “Theoretical basis of analysis of ship electrical power system controllability and its elements.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 54–58.

4. Litvinov, V. V., and T. P. Marjanovich. *Metody postroyeniya imitacionnykh sistem*. Kiev.: Naukova dumka, 1991.

5. Mihalevich, V. S., and V. L. Volkovich. *Vychislitelnye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem*. M.: Nauka, 1982.

6. Dudnik, B. Ja., V. F. Ovcharenko, V. K. Orlov, et al. *Nadezhnost i zhivuchest sistem svyazi*. M.: Radio i svyaz, 1984.

7. Gnedjuso, B. V. *Nadezhnost i jeffektivnost v tehnikе: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1987.

8. German, G. V., Ju. N. Kireev, and E. A. Melnickaja. *Nadezhnost sudovykh jelektrojenergeticheskikh sistem i sistem sudovoy avtomatiki*. SPb.: SPbGMTU, 2004.

9. Pronikov, A. S. *Nadezhnost mashin*. M.: Mashinostroenie, 1978.
10. Dedkov, V. K., and B. S. Severcev. *Osnovnye voprosy jekspluatacii slozhnyh sistem*. M.: Vysshaja shkol, 1976.
11. Cikarev, V. E. *Modeli nadezhnostii jeffektivnosti sistem*. Kiev.: Naukova dumka, 1989.
12. Zelencov, V. A., and A. A. Gagin. *Nadezhnost, zhivuchest i tehicheskoe obsluzhivanie setej svyazi*. M.: izd-vo MO SSSR, 1991.
13. Vlasov, A. B., and S. A. Buev. "Estimation of indicators of ship electrical equipment reliability, influence on the marine safety and probability of insurance risks." *VESTNIK OF MSTU* 16.4 (2013): 672–680.
14. Golovko, Sergey Vladimirovich. "Algorithmic support of ship control systems with anticipatory failure diagnosis." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2011): 28–31.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Каракоев Александр Бахтыреевич* —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*aleksandr.karakaev@list.ru, kaf\_ose@gumrf.ru*  
*Луканин Андрей Владимирович* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
*andrey.lukanin@mail.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Karakaev Aleksandr Bahtireevich* —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admaral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*aleksandr.karakaev@list.ru, a.karakaev@gumrf.ru*  
*Lukanin Andrey Vladimirovich* —  
PhD, associate professor.  
Admaral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*andrey.lukanin@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

УДК621.314.69

**И. А. Сакович,  
А. И. Черевко,  
Е. В. Лимонникова**

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Описан новый метод параметрического математического моделирования управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформатора с вращающимися магнитными полями с любым числом секций вторичной круговой обмотки. Для расчета взаимоиндуктивных связей внутри полуобмоток круговой обмотки и между ними предлагается использование диагонально-постоянной матрицы Теплица. Приводятся выражения, позволяющие упростить описание электромагнитных процессов и составляющие суть нового метода математического описания данных выпрямителей. Представлены результаты математического моделирования работы управляемого выпрямителя в MATLAB для известных классических и новых импульсно-фазовых способов управления: для способа управления, дающего удвоенное число пульсаций, для случая, когда круговая обмотка содержит четное число секций, и для ступенчато-хордового способа управления. Сделаны выводы о перспективности применения данного способа математического моделирования при исследовании других типов преобразователей энергии, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями, а также различных способов управления преобразователями с использованием широких возможностей MATLAB.

**Ключевые слова:** трансформатор с вращающимся магнитным полем, математическое моделирование, способ управления, выпрямитель, полупроводниковый преобразователь, круговая обмотка.

### Математическое моделирование в исследовании ТВМП

При проектировании управляемых выпрямителей (УВ), построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП), содержащих первичную трехфазную обмотку (ТО) и вторичную круговую обмотку (КО) [1] – [3], которая может иметь различное число секций, требуется определить параметры как самого ТВМП, так и реализуемого способа управления. Применение новых способов управления, рассмотренных в работах [4], [5], отличных от импульсно-фазовых [6] – [8], значительно улучшает качество преобразуемой электрической энергии, предоставляет новые возможности по регулированию выходного напряжения. Необходимость сравнительной оценки качества электрической энергии и параметров УВ на этапе проектирования обуславливает важность применения математического моделирования.

В работах [8] – [12] были рассмотрены математические модели УВ с ТВМП, реализованные в MATLAB Simulink и Microcap. Однако проведение моделирования для произвольного числа секций КО ТВМП сопровождается значительным усложнением структуры моделей при увеличении числа секций КО, что объясняется значительным ростом числа дифференциальных уравнений, описывающих установившиеся состояния электромагнитных процессов. Важность оценки параметров УВ с ТВМП при различном количестве секций КО, а также произвольном алгоритме управления определило необходимость разработки новой параметрической математической модели.

### Геометрическая аналогия

#### круговой обмотки в задачах анализа преобразователей с ТВМП

В ряде публикаций [4] – [6] для рассмотрения электромагнитных процессов в преобразователях, выполненных на базе ТВМП, было предложено использовать геометрическую аналогию его КО, что позволило установить связь между количеством пульсаций выходного напряжения и количеством секций КО ( $N$ ) при различном их значении. Геометрически КО можно представить в виде правильного  $N$ -угольника (рис. 1). Такая геометрическая интерпретация КО ТВМП позволяет получать аналитические соотношения, основываясь на взаимных геометрических соотношениях между секциями КО и фазными обмотками ТО.

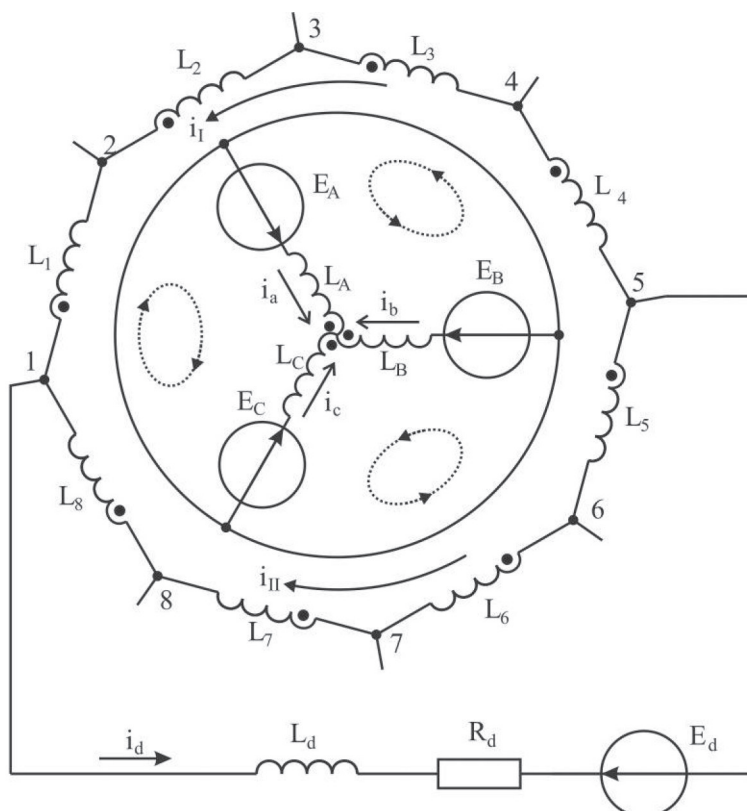


Рис. 1. Расчетная схема замещения УВ с ТВМП на первом этапе коммутации

Коммутация силовых ключей УВ с ТВМП представляет собой итерационное переключение секций КО в соответствии с алгоритмом управления. В классических импульсно-фазовых алгоритмах управления, [6] – [8], одновременно работают один силовой ключ (СКл) анодной и один СКл катодной группы, подключая отводы КО к нагрузке и разделяя ее тем самым условно на две полуобмотки. Поочередное переключение СКл в соответствии с частотой и направлением вращения результирующего вектора магнитной индукции ТВМП позволяет получать  $N$  пульсаций в выходном напряжении, если КО содержит четное число секций, и  $2N$  пульсаций, если КО содержит нечетное число секций. Разделение КО на две полуобмотки происходит и при использовании новых способов управления.

Так как аналитическое рассмотрение электромагнитных процессов в УВ с ТВМП требует учета индуктивных связей между всеми секциями КО и между секциями КО и фазными обмотками ТО, то их влияние друг на друга предлагается описывать с учетом симметрии КО. Разделение КО на две полуобмотки позволяет упростить выражения для тока в каждой секции КО, если рассматривать полуобмотку как совокупность магнитосвязанных секций, пространственно сдвинутых на угол  $2\pi/N$ .

### Описание электромагнитных процессов в УВ с ТВМП

Для анализа соотношений со взаимоиנדуктивностями удобно использовать диагонально-постоянную  $N$ -размерную матрицу Теплица, матрицу поворачивающих коэффициентов, элементы которой являются аргументами косинуса в функции нахождения взаимоиנדуктивности между двумя секциями КО, одна из которых имеет порядковый номер  $i$ , а другая  $j$ , и задаются выражением

$$\Psi_{i,j} = |i - j|. \quad (1)$$

Для  $N = 8$  матрица поворачивающих коэффициентов будет иметь вид равенства

$$\Psi|_{N=8} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Так как пространственный сдвиг между двумя смежными секциями КО составляет  $2\pi/N$  рад, то матрица взаимоиנדуктивностей  $M$ , в которой элемент  $M_{ij}$  определяет взаимоиנדуктивность между  $i$ - и  $j$ -й секциями КО (рис. 1), будет определяться выражением (3), где  $L_c$  — индуктивность секции КО;  $k$  — коэффициент магнитной связи:

$$M = kL_c \cos\left(\Psi \cdot \frac{2\pi}{N}\right). \quad (3)$$

Пусть первая полуобмотка КО имеет  $N_{s1}$  секций, а вторая полуобмотка КО —  $N_{s2} = N - N_{s1}$ . Тогда  $Ms_{11}$  — сумма всех взаимоиנדуктивностей между каждой секцией первой полуобмотки КО, учитываемая при расчете напряжения на её секциях — будет определяться суммой элементов  $N_{s1}$ -размерной подматрицы матрицы  $M$ , первый элемент которой совпадает с первым элементом матрицы  $M$ , а главная диагональ удалена (т. е. за вычетом значения  $kL_c N_{s1}$ ) (4).  $Ms_{22}$  — сумма всех взаимоиנדуктивностей между каждой секцией второй полуобмотки КО — будет определяться суммой элементов  $N_{s2}$ -размерной подматрицы матрицы  $M$ , первый элемент которой является элементом матрицы  $M$ , стоящим на пересечении первого столбца и  $(1+N_{s1})$ -й строки (5).

$$Ms_{11} = -kL_C Ns_1 + \sum_{i=1}^{Ns_1} \sum_{j=1}^{Ns_1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_1-1} \left( 2x \cos \left( (Ns_1 - x) \frac{2\pi}{N} \right) \right); \quad (4)$$

$$Ms_{22} = -kL_C Ns_2 + \sum_{i=1}^{Ns_2} \sum_{j=1}^{Ns_2} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_2-1} \left( 2x \cos \left( (Ns_2 - x) \frac{2\pi}{N} \right) \right). \quad (5)$$

$Ms_{12}$  — сумма всех взаимоиндуктивностей от каждой секции одной полуобмотки к каждой секции другой полуобмотки — будет определяться суммой элементов подматрицы матрицы  $M$  (6), первый элемент которой стоит на пересечении первого столбца и  $Ns_1$ -й строки и имеющей размер  $Ns_2$  строк на  $Ns_1$  столбцов.

$$Ms_{12} = \sum_{i=1+N_{s1}}^N \sum_{j=1}^{Ns_1} M_{i,j} = kL_C \sum_{x=1}^{Ns_1-1} \left( \sum_{y=1}^{Ns_2-1} \cos \left( (x+y-1) \frac{2\pi}{N} \right) \right). \quad (6)$$

Сумма всех взаимоиндуктивностей между каждой секцией рассматриваемой полуобмотки КО и секцией ТО будет определяться подобным образом, но с учетом пространственного углового сдвига секции ТО относительно целой полуобмотки КО, а также угла управления  $\alpha$ .

Электромагнитные процессы в УВ с ТВМП в установившихся состояниях описываются формулами (7) – (12):

$$\begin{aligned} e_a(t) - e_b(t) &= (L_{TO} - M_{TO}) \left( \frac{d}{dt} i_a(t) - \frac{d}{dt} i_b(t) \right) + R_{TO} (i_a(t) - i_b(t)) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+Ns_1(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) - \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_I(t) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+Ns_2(n)-1} \left( -\cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) + \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{II}(t); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} e_b(t) - e_c(t) &= (L_{TO} - M_{TO}) \left( \frac{d}{dt} i_b(t) - \frac{d}{dt} i_c(t) \right) + R_{TO} (i_b(t) - i_c(t)) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+Ns_1(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_I(t) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+Ns_2(n)-1} \left( -\cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \frac{d}{dt} i_{II}(t); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} e_d(t) &= (Ns_1(n) \cdot L_C + Ms_{11}) \frac{d}{dt} i_I(t) + R_d i_a(t) + L_d \frac{d}{dt} i_d(t) - Ms_{12} \frac{d}{dt} i_{II}(t) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+Ns_1(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_a(t) - \\ &- k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+Ns_1(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \frac{2\pi}{3} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_b(t) - \\ &- k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=A(n)}^{A(n)+Ns_1(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} - \frac{2\pi}{3} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_c(t); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} e_d(t) &= (Ns_2(n) \cdot L_C + Ms_{22}) \frac{d}{dt} i_{II}(t) + R_d i_a(t) + L_d \frac{d}{dt} i_d(t) - Ms_{12} \frac{d}{dt} i_I(t) - \\ &- k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+Ns_2(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_a(t) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+Ns_2(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} + \frac{2\pi}{3} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_b(t) + \\ &+ k\sqrt{L_{TO}L_C} \sum_{x=K(n)}^{K(n)+Ns_2(n)-1} \left( \cos \left( x \frac{2\pi}{N} - \frac{2\pi}{3} + \Delta + \alpha \right) \right) \frac{d}{dt} i_c(t); \end{aligned} \quad (10)$$

$$i_c(t) = -i_a(t) - i_b(t); \quad (11)$$

$$i_d(t) = i_l(t) + i_{ll}(t). \quad (12)$$

В уравнениях (7) – (12)  $L_{TO}$ ,  $R_{TO}$  — индуктивность и сопротивление секций ТО;  $e_a(t)$ ,  $e_b(t)$ ,  $e_c(t)$  — мгновенные значения фазных ЭДС трехфазной питающей сети;  $L_c$  и  $R_c$  — индуктивность и сопротивление секций КО;  $L_d$ ,  $R_d$  и  $e_d(t)$  — индуктивность, сопротивление и мгновенное значение собственной ЭДС нагрузки;  $A(n)$  и  $K(n)$  — анодный и катодный силовые ключи для  $n$ -временного этапа коммутации;  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  — токи в секциях ТО;  $i_l(t)$ ,  $i_{ll}(t)$  — мгновенные значения токов в первой и второй полуобмотках КО;  $\alpha$  — угол управления;  $\Delta$  — пространственный фазовый сдвиг между фазной обмоткой фазы А ТО и первой секцией КО.

Решение системы дифференциальных уравнений (7) – (10) относительно вектора дифференциалов искомых токов  $(di_a(t)/dt, di_b(t)/dt, di_l(t)/dt, di_{ll}(t)/dt, di_c(t)/dt, di_d(t)/dt)^T$ , выраженного из (7) – (12), дает мгновенные значения соответствующих токов в секциях ТО и в полуобмотках КО, а также в нагрузке, позволяя произвести расчет значений интересующих напряжений.

### Результаты моделирования

Результаты моделирования УВ с ТВМП с  $N=8$  секциями КО при классическом способе управления, полученные в MATLAB без использования Simulink с помощью функции *ode15s* для решения жестких дифференциальных уравнений методом обратного дифференцирования, показаны на рис. 2 – 4. Рис. 5 и 6 отображают результаты моделирования ступенчато-хордового способа управления, а рис. 7 — способа управления, дающего удвоенное число пульсаций по сравнению с классическим способом управления. Для сохранения наглядности формы пульсаций сопротивление и индуктивность нагрузки выбраны незначительными. Полученные результаты согласуются с аналитическим описанием и результатами испытаний опытного образца УВ с ТВМП мощностью 4 кВт, в котором был реализован классический способ управления, проведенных АО «СПО «Арктика» в ходе выполнения опытно-конструкторской работы, выполняемой в рамках федерально-целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 гг. [13]. Это позволяет получить соответствие между моделированием и результатами работы УВ с ТВМП при применении ступенчато-хордового способа управления, когда КО содержит произвольное число секций и способа управления, дающего удвоенное число пульсаций в выходном напряжении, когда КО выполнена с четным числом секций.

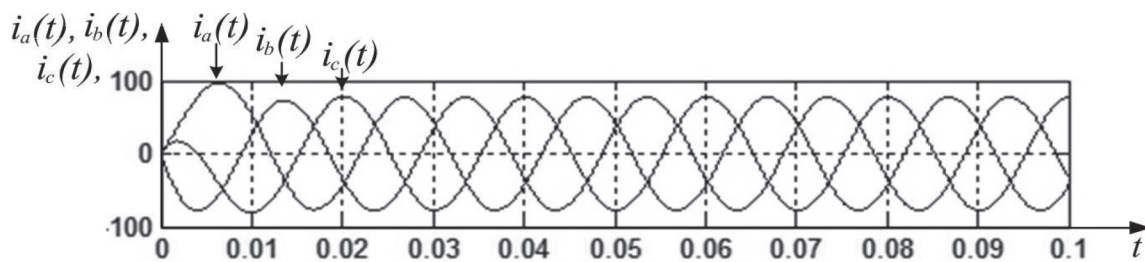


Рис. 2. Токи в секциях ТО ТВМП при  $N=8$  и классическом способе управления

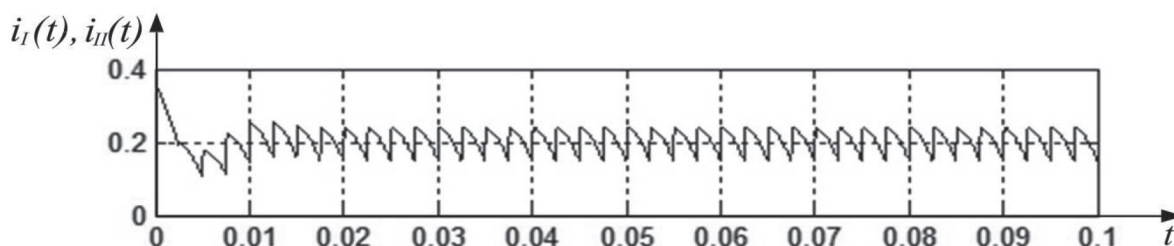


Рис. 3. Токи в полуобмотках КО ТВМП при  $N=8$  и классическом способе управления

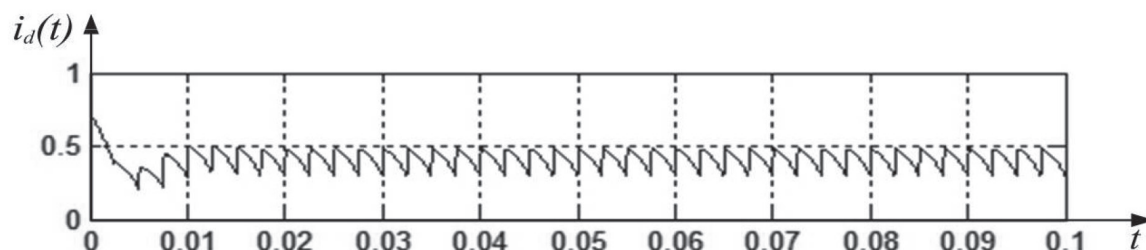


Рис. 4. Выпрямленный ток УВ с ТВМП при  $N=8$  и классическом способе управления

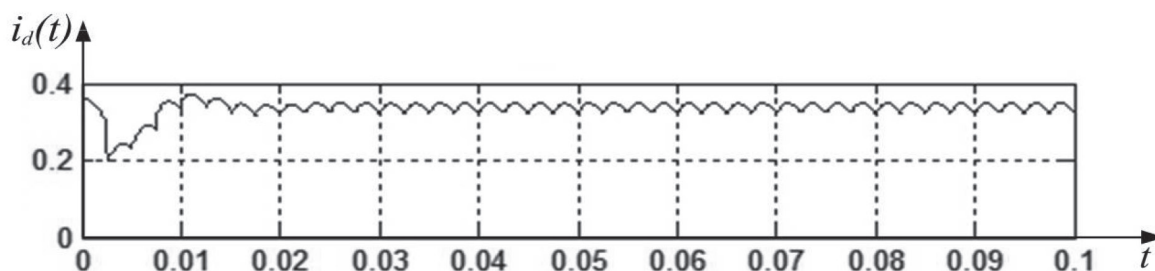


Рис. 5. Ток нагрузки ТО ТВМП при  $N=8$  и ступенчато-хордовом способе управления на третьей ступени регулирования при  $\alpha = 0^\circ$

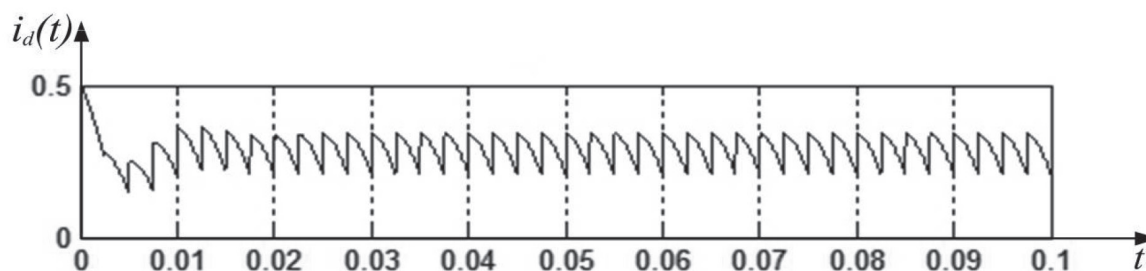


Рис. 6. Ток нагрузки КО ТВМП при  $N=8$  и ступенчато-хордовом способе управления на третьей ступени регулирования при  $\alpha = 30^\circ$

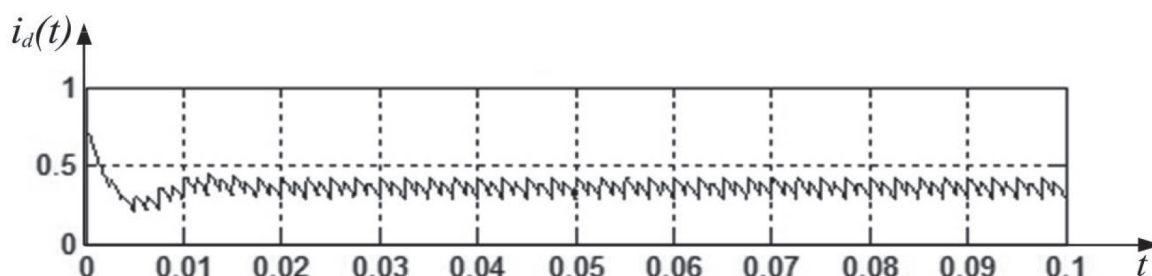


Рис. 7. Ток нагрузки УВ с ТВМП с  $N=8$  при  $\alpha = 50^\circ$  и способе управления, дающем удвоенное число пульсаций

### Выводы

Преимуществом разработанной модели является возможность ее параметризации, т. е. изменения параметров модели путем задания исходных данных для моделирования: числа секций круговой обмотки (как четного, так и нечетного), параметров трехфазной питающей сети, в том числе ее асимметрии, параметров ТВМП (сопротивлений и индуктивностей секций КО и ТО), параметров нагрузки. Предлагаемая математическая модель позволяет также исследовать различные способы управления, в том числе ступенчато-хордовый способ, описанный в работах [4], [5], и способ управления, дающий удвоенное число пульсаций в выходном напряжении УВ с ТВМП

при четном числе секций КО. Модель позволяет проводить анализ переходных процессов, аварийных режимов, анализировать влияние несимметрии питающих напряжений на качество выпрямленного напряжения. Так как выходными данными модели для каждого шага моделирования являются векторы мгновенных значений токов, то, интерполируя их средствами MATLAB, можно проводить исследования с применением методов цифровой обработки сигналов, в том числе использовать БПФ для спектрального анализа, предварительно проведя выравнивание и децимацию по времени до количества выборок, кратного числу, являющемуся целой степенью двойки.

Анализ геометрической интерпретации обмоток ТВМП позволяет упростить математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в УВ с ТВМП, одновременно дополнив его новыми возможностями в части изменения исходных данных. Описанный метод позволяет разрабатывать математические модели как для различных конструкций управляемых выпрямителей [14], так и для других, построенных на базе ТВМП преобразователей, рассматриваемых в публикациях [15] – [17].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2525298 Российская Федерация, МПК Н 01 F 30/14, Н 02 М 5/14. Трансформатор с трехфазной и круговой обмотками / Кузьмин И. Ю., Лимонникова Е. В., Музыка М. М., Платоненков С. В., Потего П. И., Сакович И. А., Телепнев А. И., Черевко А. И.; заявитель ОАО «СПО «Арктика»; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли. — № 2012144789/07; заявл. 23.10.12; опубл. 10.08.14, Бюл. № 22. — 10 с.
2. Пат. 2534218 Российская Федерация, МПК Н 01 F 30/14. Многофазный трансформатор / Сеньков А. А., Сеньков А. П., Калмыков А. Н.; заявитель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». — № 2013131331/07; заявл. 08.07.2013; опубл. 27.11.13.
3. Коптяев Е. Н. Трансформатор с вращающимся магнитным полем как структура с дополнительной степенью свободы / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 1 (26). — С. 73. DOI: 10.15862/93TVN115.
4. Платоненков С. В. Ступенчато-хордовый алгоритм управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / С. В. Платоненков // Материалы XIII молодежной науч.-технич. конф. «Взгляд в будущее — 2015». — СПб.: ОАО ЦКБ МТ «Рубин», 2015. — С. 453–459.
5. Сакович И. А. Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.
6. Черевко А. И. Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.
7. Музыка М. М. Алгоритмы работы силовых ключей в составе коммутаторов управляемых выпрямителей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями / М. М. Музыка, А. И. Черевко, С. В. Платоненков [и др.] // Инновационное развитие северных территорий России: образование, наука, производство: сб. докладов на науч.-практич. конф. — Северодвинск, 2010. — С. 106–113.
8. Музыка М. М. Совершенствование полупроводниковых преобразователей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями в судовых электротехнических системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М. М. Музыка. — Северодвинск, 2008.
9. Черевко А. И. Схемотехническое и математическое моделирование полупроводниковых преобразователей, содержащих согласующие трансформаторы с вращающимися магнитными полями: монография; под ред. А. И. Черевко / А. И. Черевко, М. М. Музыка, Е. В. Лимонникова. — Архангельск: ИД САФУ, 2005. — 179 с.
10. Сингаевский Н. А. Математическая модель ТВП в системе Matlab / Н. А. Сингаевский, Н. А. Суртаев // Материалы междунар. науч. конф. «Технические и технологические системы». — Краснодар: КубГАУ, 2009. — С. 103–107.
11. Музыка М. М. Исследование эффективности работы управляемых выпрямителей методами математического моделирования в МС и/или Matlab: монография; под ред. А. И. Черевко. / М. М. Музыка [и др.]. — Архангельск: ИД САФУ, 2014. — 107 с.

12. Сингаевский Н. А. Теоретические и схемотехнические основы силовых полупроводниковых преобразователей на базе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Н. А. Сингаевский. — Краснодар, 2011.

13. Кузьмин И. Ю. Сравнительный анализ параметров и характеристик управляемых выпрямителей, построенных на базе ТВМП, разработанных для кораблей и судов арктического региона, с отечественными выпрямителями / И. Ю. Кузьмин // Материалы XIII молодежной науч.-технич. конф. «Взгляд в будущее – 2015». — СПб.: ОАО ЦКБ МТ «Рубин», 2015. — С. 324–340.

14. Григораш О. В. Выпрямители на трансформаторах с вращающимся магнитным полем / О. В. Григораш, Г. С. Отмахов // Научный журнал КубГАУ. — 2014. — № 98. — С. 560–570.

15. Коптяев Е. Н. Статические полупроводниковые преобразователи с повышенной надежностью и электромагнитной совместимостью на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич, И. Ю. Кузьмин // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 1 (26). — С. 72. DOI: 10.15862/92TVN115.

16. Коптяев Е. Н. Система электродвижения морских судов / Е. Н. Коптяев // Сб. науч. статей «Развитие науки в XXI веке: естественные и технические науки». — 2015. — Апрель. — С. 77–86. DOI: 10.17809/06(2015)-10.

17. Коптяев Е. Н. Промышленный умножитель частоты на базе трансформатора с вращающимся полем / Е. Н. Коптяев, В. М. Балашевич, П. В. Атрашкевич // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 2 (27). — С. 104.

## MATHEMATICAL MODELING OF CONTROLLED RECTIFIERS BASED ON ROTATING MAGNETIC FIELD TRANSFORMERS

*The new principle of parametric mathematical modeling of controlled rectifiers made using the transformer with rotating magnetic field made with different number of sections of the secondary circular winding and based on it is described. It is offered to applying the Toeplitz matrix for calculating the mutual inductances between half-windings of the circular winding and between of these. Given expressions allow simplifying the description of electromagnetic processes and composing the method essence of the new mathematical description of these rectifiers. Results of mathematical modeling in MATLAB of operation of controlled rectifier for classical and new phase-pulse control method: for the method that's given double number of pulses in case when the circular winding containing even number of sections and for step-chord method are given. Summary of perspective implementation of this principle for mathematical modeling by using wide MATLAB resources for analysis other types of energy converters made with transformer with rotating magnetic field and for different control algorithms are made.*

*Keywords: transformer with rotating magnetic field; mathematical modeling; control method; rectifier unit; semiconductor converter; circular winding.*

## REFERENCES

1. Kuzmin, I. Yu., E. V. Limonnikova, M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, P. I. Potego, I. A. Sakovich, A. I. Telepnev, and A. I. Cherevko. Transformator s trehfaznoj i krugovoj obmotkami. Russian Federation, assignee. Patent 2525298. 10 August 2014.

2. Senkov, A. A., A. P. Senkov, and A. N. Kalmykov. Mnogofaznyj transformator. Russian Federation, assignee. Patent 2534218. 27 November 2013.

3. Koptyaev, E. N., V. M. Balashevich, P. V. Atrashkevich, Yu. V. Dushkin, and I. V. Kuznetsov. "A transformer with rotating magnetic field as structure with addition degree of freedom." *On-line Journal "Naukovedenie"* 7.1(26) (2015): 73. DOI: 10.15862/93TVN115.

4. Platonenkov, S. V. "Stupenchato-hordovyy algoritm upravleniya vyprjamatelem, postroennym na baze transformatora s vrashhajushhimsja magnitnym polem." *Materialy XIII molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Vzglyad v budushhee — 2015»*. SPb.: ОАО «СКБ МТ «Рубин», 2015: 453–459.

5. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Kachestvo vyhodnogo napryazheniya upravljajemogo vyprjamatelja na baze transformatora s vrashhajushhimsja magnitnym polem." *Electrical Technology Russia* 1 (2016): 43–49.

6. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuzmin. "Kachestvo vyhodnogo napryazheniya vyprjamatelej, postroennogo na baze TVMP, pri chjotnom i nechjotnom chisle sekcij KO TVMP." *Russian Electrical Engineering* 4 (2012): 41–45.
7. Muzyka, M. M., A. I. Cherevko, S. V. Platonenkov, et al. "Algoritmy raboty silovyh kljuchej v sostave kommutatorov upravljajemyh vyprjamatelej s transformatorami s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami." *Innovacionnoe razvitie severnyh territorij Rossii: obrazovanie, nauka, proizvodstvo: sbornik dokladov na nauchno-prakticheskikh konferencijah*. Severodvinsk, 2010: 106–113.
8. Muzyka, M. M. Sovershenstvovanie poluprovodnikovyh preobrazovatelej s transformatorami s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami v sudovyh elektrotehnicheskikh sistemah. PhD diss. Severodvinsk, 2008.
9. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, and E. V. Limonnikova. *Shemotehnicheskoe i matematicheskoe modelirovanie poluprovodnikovyh preobrazovatelej, sodержashhih soglasujushhie transformatory s vrashhajushhimisja magnitnymi poljami: monografija*. Arhangel'sk: ID SAFU, 2005.
10. Singaevskij, N. A., and N. A. Surtaev. "Matematicheskaja model TVP v sisteme Matlab." *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Tehnicheskie i tehnologicheskie sistemy»*. Krasnodar: KubGAU, 2009: 103–107.
11. Muzyka, M. M., et al. *Issledovanie jeffektivnosti raboty upravljajemyh vyprjamatelej metodami matematicheskogo modelirovanija v MS i/ili Matlab: monografija*. Arhangel'sk: ID SAFU, 2014.
12. Singaevskij, N. A. Teoreticheskie i shemotehnicheskie osnovy silovyh poluprovodnikovyh preobrazovatelej na baze mnogofaznyh transformatorov s vrashhajushhimisja magnitnym polem. Dr. diss. Krasnodar, 2011.
13. Kuzmin, I. Ju. "Sravnitelnyj analiz parametrov i harakteristik upravljajemyh vyprjamatelej, postroennyh na baze TVMP, razrabotannyh dlja korablej i sudov arkticheskogo regiona, s otechestvennymi vyprjamateljami." *Materialy XIII molodezhnoj nauchno-tehnicheskij konferencii «Vzgljad v budushhee — 2015»*. SPb.: OAO «CKB MT «Rubin», 2015: 324–340.
14. Grigorash, O. V., and G. S. Otmahov. "The rectifier on transformers with rotating magnetic field." *Scientific Journal of KubSAU* 98 (2014): 560–570.
15. Koptjaev, E. N., V. M. Balashevich, P. V. Atrashkevich, Ju. V. Dushkin, and I. V. Kuznetsov. "Static semiconductor converters with improved reliability and electromagnetic compatibility on the basis of a transformer with a rotating magnetic field." *On-line Journal «Naukovedenie»* 7.1(26) (2015): 72. DOI: 10.15862/92TVN115.
16. Koptjaev, E. N. "The system of electrical motions of marine vessels." *The Development of Science in the 21st Century: Natural and Technical Sciences* апрель (2015): 77–86. DOI: 10.17809/06(2015)-10.
17. Koptjaev, E. N., V. M. Balashevich, and P. V. Atrashkevich. "Industrial frequency multiplier based on a transformer with a rotating field." *On-line Journal «Naukovedenie»* 7.2(27) (2015): 104.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сакович Игорь Александрович —  
руководитель группы разработки  
и внедрения информационных технологий  
ЗАО «Биус»  
igorsakovitch@gmail.com  
Черевко Александр Иванович —  
доктор технических наук, профессор.  
ИСМАРТ САФУ  
cherevko-ai@mail.ru  
Лимонникова Елена Владимировна —  
кандидат технических наук.  
ИСМАРТ САФУ  
e.limonnikova@narfu.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sakovich Igor Aleksandrovich —  
Head of the development team.  
"Bius"  
igorsakovitch@gmail.com.  
Cherevko Aleksander Ivanovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Branch of the North (Arctic)  
Federal University (NFU)  
cherevko-ai@mail.ru  
Limonnikova Elena Vladimirovna — PhD.  
Branch of the North (Arctic)  
Federal University (NFU)  
e.limonnikova@narfu.ru.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2016 г.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.396

**В. В. Сахаров,  
А. А. Чертков,  
С. В. Сабуров**

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Современные средства математического программирования и исследования операций являются мощным механизмом совершенствования систем управления судовыми динамическими объектами и системами, определения способов их алгоритмизации и синтеза на качественно новом уровне. Оптимальные системы могут приниматься в качестве эталона, к которому следует стремиться при создании реальных систем. Вместе с тем, несмотря на широкий круг научных публикаций в данной предметной области, по-прежнему остаются не в полной мере решенными вопросы создания алгоритмов и программных средств эффективного применения численных методов оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта с должным научным обоснованием. Важный класс систем управления составляют судовые системы, обеспечивающие максимальное быстродействие, что позволяет сократить время переходных процессов и, следовательно, повысить производительность работы судовых динамических объектов и систем различного назначения. В работе приводятся алгоритмы синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с использованием функций линейного программирования и нелинейных функций — решателей *fmincon*, что позволяет, в отличие от существующих методов синтеза быстродействующих систем, получить численный алгоритм оптимизации с использованием ленточной структуры дискретных динамических ограничений. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.*

*Ключевые слова:* алгоритмы, синтез, судовые динамические объекты, дискретные системы, управление по быстродействию, математическое программирование, функции-решатели, ленточные структуры матриц, ограничения-неравенства, критерии качества.

**Вводная часть.** Методы математического программирования, созданные для решения вариационных задач по численным алгоритмам, можно отнести к основному механизму получения научно обоснованных решений для управления технологическими процессами и производствами на объектах водного транспорта. Согласно исследованиям авторов работ [1] – [6], все большее применение методы математического программирования находят на судах, где требуется получать в оперативной обстановке эффективные решения по вопросам бизнеса, оптимизации маршрутов движения, безопасности плавания при изменении погодных условий, выбирать экономичные режимы движения судов в рейсе с учетом ситуации на линии и в портах назначения. Методы исследования операций используются для принятия обоснованных решений в судоремонте, для диагностики технического состояния судовых энергетических комплексов, текущего контроля (в режиме *on line*) корпуса судна и его элементов в рейсе в условиях движения на волнении, а также для решения комплекса задач по выполнению грузовых операций и составлению карго-планов [7].

Численные методы и алгоритмы оптимизации, базирующиеся на фундаментальных положениях математического программирования, являются эффективным механизмом поиска оптимальных решений, поскольку позволяют использовать вычислительные средства для исследования динамических моделей с расщепленными граничными условиями. В работах [8] – [10] отмечается, что способы численной оптимизации могут успешно применяться для управления нелинейными системами, относящимися к классу плохо формализуемых технологических задач, как правило,

не поддающихся аналитическому решению. Особый класс составляют хаотические системы управления с аттракторами сложной формы, для синхронизации которых, наряду с принципами декомпозиции и градиентными процедурами анализа, требуются новые, научно обоснованные методы решения. Использование методов геометрического программирования для решения задач с полиномиальными функциями требует проведения структурного анализа и выполнения условий ортогональности с обеспечением устойчивости и требуемой скорости сходимости итерационных процессов вычислений.

Важным механизмом повышения эксплуатационных показателей с позиций системности является комплекс эффективных научно обоснованных решений в данной предметной области, получаемых методами моделирования и алгоритмизации с применением инструментария вычислительных сред и компьютерных технологий.

Из накопленного опыта решения задач оптимизации известно, что нелинейные системы позволяют существенно расширить арсенал методов и средств принятия решений, синтеза, можно добиться существенного повышения эффективности и качества функционирования сложных технологических процессов и производств. Исследования в перечисленных направлениях позволяют решать задачи синтеза законов оптимального управления с помощью нелинейных регуляторов, применять модели и алгоритмы для реализации энергоэффективных технологий, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к замкнутым системам.

Создание моделей и алгоритмов автоматизации судовых динамических объектов требует разработки компьютерных моделей на базе обобщенных уравнений динамики объектов. Алгоритмизация и программная поддержка моделирования технологических режимов производится с использованием численных методов [11] решения дифференциальных уравнений, объектов LTI в среде MATLAB [12]. Среда содержит систему функций для преобразования моделей в форме передаточных функций к виду пространства состояний и наоборот, перехода от непрерывных систем к дискретным системам, получения решения в частотной области, исследования траекторий корней характеристических уравнений и др. В результате с помощью встроенных функций созданы алгоритмы и произведен синтез систем управления судовыми динамическими объектами с использованием средств математического программирования и параметрической оценки моделей систем по эксперименту. Внимание уделено алгоритмам оценки параметров модели судна по измерениям, произведенным на эволюционном периоде траектории.

Таким образом, актуальным направлением совершенствования систем управления судовыми динамическими объектами и системами является определение способов их алгоритмизации и синтеза на качественно новом уровне с применением арсенала математического инструментария мощных вычислительных сред, позволяющих без существенных материальных затрат повышать эксплуатационные показатели и качество судовых систем и объектов. Поскольку задачи оптимизации судовых систем, в общем случае, являются многомерными, то по этой причине усложняется поиск оптимальных решений, основанных, как правило, на принятии некоторых компромиссных оценок, которые, вообще говоря, могут не отвечать оптимуму ни по одному из критериев. Актуальность решения задач данной проблематики подтверждается усилением требований к эффективности применения алгоритмов и моделей оптимизации таких эксплуатационных показателей как быстродействие судовых систем.

Преодоление сложностей в решении комплекса задач синтеза оптимальной по быстродействию системы управления судовым объектом, по мнению авторов, возможно на основе эффективного применения численных методов оптимизации с использованием линейного и нелинейного программирования, а также методов дискретной комбинаторной оптимизации, адекватных реальным процессам.

**Основная часть.** Для удобства структурного анализа судовой динамической системы ее модель представим уравнениями в конечных разностях. С этой целью выберем интервал дискретности, отражающий специфику поведения объекта по завершении каждого шага:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k), k = 0, 1, \dots, N-1; \quad (1)$$

$$y(k) = C_d \cdot x(k) + D_d \cdot u(k), \quad (2)$$

где  $A_d$  — матрица состояния размерности  $[n \times n]$ ;  $B_d$  — матрица управления размерности  $[n \times m]$ ;  $C_d$  — матрица измерений вектора переменных состояния размерности  $[p \times n]$ ;  $D_d$  — матрица «управление-выход» размерности  $[p \times m]$ ;  $x(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_n(k)]^T$  — вектор переменных состояния;  $u = [u_1(k) \ u_2(k) \ \dots \ u_m(k)]$  — вектор управления;  $y(t) = [y_1(k) \ \dots \ y_p(k)]^T$  — вектор выхода. Граничные условия:  $y(0)$  и  $y(N)$ .

На управление  $u(k)$  наложено ограничение следующего вида:

$$|u(k)| \in U_m.$$

Необходимо получить такие  $u(k)$ , чтобы в конечную точку траектории система была переведена за минимальное время  $T_{\min}$ .

Алгоритм и процедуру синтеза дискретной системы (1) – (2) можно реализовать путем выполнения следующих операций.

1. *Определение параметров модели непрерывной динамической системы, формулировка критерия качества* Динамическая система представляется в среде MATLAB в LTI-формате. Формулируется критерий оптимальности — функция цели (максимальное быстродействие).

2. *Преобразование непрерывной модели с матрицами A, B, C и D в объект пространства состояний (ss-форму) с помощью оператора ss:*

$$V = ss(A, B, C, D).$$

3. *Переход от непрерывной модели к дискретной.* Операция выполняется с помощью функции *c2d*, что позволяет использовать LTI-модель  $V$ .

4. *Задание граничных условий и назначение максимального числа шагов N.*

5. *Процедура формирования ленточных матриц.*

6. *Переход к разреженным матрицам.* Осуществляется с помощью оператора *sparse*.

7. *Решение задачи оптимизации методом нелинейного программирования и графические построения.*

Функционирование алгоритма рассмотрим на конкретном примере. С этой целью выберем непрерывную во времени систему со следующими численными значениями элементов матриц (п. 1 алгоритма):

$$A = [0 \ 1; \ 0 \ -1]; \ B = [0 \ 1]'; \ C = [1 \ 0; \ 0 \ 1]; \ D = [0 \ 0]'$$

В соответствии с п. 2 вычислительного алгоритма, динамическую систему представим в LTI-формате, т. е.

$$V = ss(A, B, C, D).$$

Полученные численные значения блока LTI имеют вид:

$$V.a = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \ V.b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \ V.c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \ V.d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для перехода от непрерывной модели к дискретной (п. 3 алгоритма) с шагом  $\tau$  воспользуемся матричным экспоненциалом:

$$\exp m(A) = \begin{bmatrix} 1 & 1 - \exp(-\tau) \\ 0 & \exp(-\tau) \end{bmatrix}.$$

Применение матричного экспоненциала позволяет получить уравнения динамики в общем виде. При шаге  $\tau = 0.1$  с уравнения (1) и (2) для рассматриваемой модели в дискретной форме принимают вид:

$$y_1(k+1) = y_1(k) + (1 - \exp(-\tau)) \cdot y_2(k) + (\exp(-\tau) + \tau - 1) \cdot u(k); \quad (3)$$

$$y_2(k+1) = \exp(-\tau) \cdot y_2(k) + (1 - \exp(-\tau)) \cdot u(k); \quad (4)$$

$$|u(k)| \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (5)$$

Используя в уравнениях (3) – (5) численные значения элементов матриц  $V.a$ ,  $V.b$ ,  $V.c$  и  $V.d$ , получим модель дискретной системы для LTI-объекта  $V$ :

$$Vd = c2d(V, 0.1, 'zoh').$$

В результате будем иметь следующие матрицы, входящие в объект  $Vd$ :

$$Vd.a = \begin{bmatrix} 1 & 0,095163 \\ 0 & 0,90484 \end{bmatrix}; Vd.b = \begin{bmatrix} 0,0048374 \\ 0,095163 \end{bmatrix}; Vd.c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; Vd.d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Видно, что согласно синтаксису функции, кроме введения в структуру  $c2d$  объекта  $V$  при шаге дискретности  $\tau = 0.1$ , требуется также указать способ дискретизации (восстановления) сигнала управления посредством оператора  $'zoh'$  (ZOH — Zero Order Hold — восстановление сигнала полиномом нулевого порядка). Матрицы объекта  $Vd$  по сути представляют собой составляющие уравнений динамики (1) – (2) для конкретного объекта, поскольку

$$Ad = Vd.a, Bd = Vd.b, Cd = Vd.c \text{ и } Dd = Vd.d.$$

Зададим  $N = 104$  и введем ограничения на максимально допустимый (по модулю) сигнал управления  $U_m = 1.0$ . Тогда на всех режимах (п. 4 алгоритма) должно соблюдаться условие

$$|u(k)| \in U_m.$$

В ряде случаев оценку элементов матриц уравнений динамики системы (1) можно выполнить по эксперименту на судне: измерениям векторов  $x(k)$  и  $u(k)$  в дискретные моменты времени на основе рекурсивных методов. Оценка производится на базе квадратичных критериев оптимизации, что гарантирует минимизацию погрешности вычислений.

Формирование ленточных матриц, предусмотренных п. 5 вычислительного алгоритма, составляет наиболее емкую часть синтеза оптимальной по быстродействию системы управления судовым объектом. Для выполнения этой операции в программе, составленной в кодах MATLAB, предусмотрен цикл, в котором рассчитываются составляющие ленточной матрицы  $SA$ . Далее приводится фрагмент ленточной матрицы  $SA$  размерности  $(68 \times 104)$ . Матрица составлена из блоков  $S$  по правилу, определенному структурой  $SA$ .

$$SA = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ -1 & -0,0952 & -0,0048 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & -0,9048 & -0,0952 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -0,0952 & -0,0048 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,9048 & -0,0952 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Блок  $S$  состоит из следующих элементов:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -0,0952 & -0,0048 \\ 0 & -0,9048 & -0,0952 \end{bmatrix}.$$

Поскольку  $SA$  является разреженной матрицей, для повышения эффективности вычислений в алгоритме (п. 6) применен оператор *sparse*, позволяющий сохранять  $SA$  в компактной форме путем выделения только ненулевых элементов с установлением индексации их строк и столбцов по определенному в среде MATLAB правилу. Приведенный фрагмент разреженной матрицы  $SA$  позволяет получить представление о правиле сохранения данных.

$SA =$

(1,1) 1.0000  
(3,1) -1.0000  
\*\*\* \*\*\*  
(49,33) 1.0000

с установлением

(47,34) -0.9048  
\*\*\* \*\*\*

(69,103) 1.0000  
(70,104) 1.0000.

Применение оператора *sparse* позволило уменьшить сохраняемый массив до 240 чисел за счет исключения нулевых элементов из структуры  $SA$  размерности  $(70 \times 104)$ , т. е. при наличии 7280 чисел.

Для выполнения вычислений (п. 7 алгоритма) применен оператор нелинейного программирования *fmincon*. Этот оператор выполняет поиск минимального значения скалярной функции нескольких переменных в условиях ограничений. Ограничения могут быть в виде линейных равенств и неравенств, заданных в матричной форме. В случае необходимости предусматривается введение нелинейных ограничений в виде отдельных файлов. Критерий качества выбран в виде функции

$$J=0.0001 \cdot \exp(0.2 \cdot k) \cdot \text{abs}(x),$$

содержащей экспоненциальную составляющую. Функция, как следует из равенства, на всех шагах является положительной. Минимум времени переходного процесса обеспечивается путем увеличения «веса» с возрастанием  $k$ .

Расчет завершается с получением последовательности векторов  $y_1(k)$ ,  $y_2(k)$ ,  $u(k)$ . Для их выбора из  $N$  значений с помощью алгоритма формируются массивы  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ , а затем определяют порядковые номера переменных состояния и управления. В результате находятся  $y_1 = x(t_1)$ ,  $y_2 = x(t_2)$  и  $u = [x(t_3); 0]$ .

На рис. 1 изображены текущие значения переменных состояния и вектора управления, соответствующие минимальному времени переходного процесса.

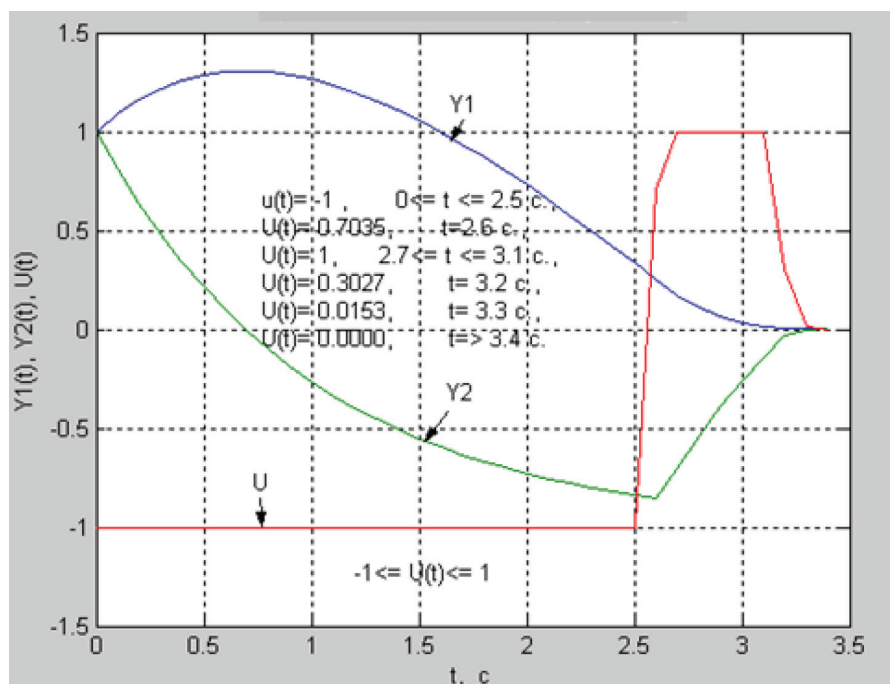


Рис. 1. Расчет методом нелинейного программирования быстродействующей динамической системы управления

Из рис. 1 следует, что максимальное быстродействие системы управления обеспечивается при следующих значениях  $u(t)$ :

$$\begin{cases} -1, & \text{если } 0 \leq t \leq 2,5 \text{ с;} \\ 0,7035, & \text{если } t = 2,6 \text{ с;} \\ 1, & \text{если } 2,7 \leq t \leq 3,1 \text{ с;} \\ 0,3027, & \text{если } t = 3,2 \text{ с;} \\ 0,0153, & \text{если } t = 3,3 \text{ с;} \\ 0, & \text{если } t \geq 3,4 \text{ с.} \end{cases}$$

Таким образом, если реализовать  $u(t)$  по приведенной программе, то переходный процесс в системе, находящейся в начальном состоянии  $y_1(0) = 1, y_2(0) = 1$ , завершится за минимальное время, равное  $t = 3,4$  с. Система будет переведена из заданного начального состояния в конечное с координатами «рабочей» точки  $y_1(3,4) = 0, y_2(3,4) = 0$ .

Применение линейного программирования (ЛП) для оптимального управления судовыми динамическими объектами позволяет значительно расширить класс решаемых вариационных задач численными методами, обладающими свойствами сходимости итерационных процессов. Однако при этом требуется учитывать специфику управляемого объекта и возможность приведения конкретной задачи к виду, допускающему применение «линейных» критериев качества в рекуррентных оценках. Преимущество линейного программирования состоит в том, что симплекс-метод, являющийся основой направленного поиска оптимальных решений в условиях линейных ограничений, обладает сходимостью и реализуется с помощью программ высокого качества, содержащихся практически во всех вычислительных средах, применяемых для выполнения инженерных и научных расчетов. Для выполнения расчетов пользователь должен лишь сформулировать задачу с учетом требований синтаксиса функции и правильно распорядиться исходными данными. К преимуществам вычислительных сред линейного программирования следует отнести возможность их применения для решения задач высокой размерности вектора переменных состояния и записи данных в виде разреженных матриц, что обеспечивает «сжатие» информации в процессе вычислений.

Эффективность применения линейного программирования в известной мере зависит от навыков оператора и корректности формулировки задачи автоматизации технологических процессов в терминах моделей ЛП. В отдельных случаях эффективность может быть повышена путем линеаризации уравнений, корректного использования линейных полиномов, выбора «нулевого» приближения при решении задач высокой и средней размерности, применения опций для улучшения процесса вычислений, выбора решателей, выполнения параллельных вычислительных схем, графической интерпретации результатов поиска экстремумов. Следует также иметь в виду, что задачи ЛП в обычной «стандартной» формулировке обеспечивают процесс планирования, т. е. коррекция решений при изменении коэффициентов уравнений производится без обратных связей. Однако программный инструментарий ЛП может быть приспособлен к построению механизма рекуррентных вычислений с реализацией управления с обратной связью дискретными моделями технологических процессов на судах.

Большие перспективы практического применения ЛП на водном транспорте открываются в связи с развитием пост-оптимального анализа в теории ЛП, поскольку последний ориентирован на оптимизацию технологических процессов, характеризуемых изменениями коэффициентов уравнений и критериев качества в зависимости от условий функционирования объектов автоматизации. Приспособленность данного класса задач к учету структурных изменений моделей систем позволяет выбирать альтернативные решения, близкие по конечному результату, но обладающие рядом преимуществ в сравнении с исходными задачами. Адаптация обеспечивается на основе использования градиентных методов, определения предиктивно-коррективных направлений, критериев остановки вычислительных процессов и др.

Для демонстрации применения моделей ЛП к решению задач оптимизации по быстродействию рассмотрим следующую систему, представленную в дискретной форме:

$$x(0) = b(0);$$

$$x(k) = A \cdot x(k-1) + B \cdot u(k-1) + b(k-1), \quad k = 1, 2, \dots, T, \quad (6)$$

где  $x(k)$  —  $n$ -мерный вектор состояния;  $u(k-1)$  —  $m$ -мерный вектор управления;  $b(k)$  —  $n$ -мерный вектор помехи;  $A$  и  $B$  — известные матрицы размерности  $(n \times n)$  и  $(m \times n)$  соответственно система ограничений может быть записана в виде лестничной структуры

$$\begin{array}{rcl} x(0) & & = b(0) \\ -A \cdot x(0) - B \cdot u(0) + x(1) & & = b(1) \\ -A \cdot x(1) - B \cdot u(1) + x(2) & & = b(2) \\ \vdots & & \vdots \\ -A \cdot x(T-1) - B \cdot u(T-1) + x(T) & = & b(T) \end{array}$$

Запишем ограничения в блочной форме:

| $x(0)$ | $u(0)$ | $x(1)$ | $u(1)$ | $x(2)$ | ...      | $x(T-1)$ | $u(T-1)$ | $x(T)$ | 1        |
|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|
| $I$    |        |        |        |        |          |          |          |        | $b(0)$   |
| $-A$   | $-B$   | $I$    |        |        |          |          |          |        | $b(1)$   |
|        |        | $-A$   | $-B$   | $I$    |          |          |          |        | $b(2)$   |
|        |        |        |        |        | $\ddots$ |          |          |        | $\vdots$ |
|        |        |        |        |        |          | $-A$     | $-B$     | $I$    | $b(T-1)$ |

Ленточная структура для задач большой размерности обычно представляется многомерным массивом, формирование которого легко программируется в среде MATLAB.

Работу алгоритма ЛП в виде ленточной структуры рассмотрим на примере управления по быстродействию судовым динамическим объектом, представленным уравнениями (1) – (2):

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u; \quad y = C \cdot x + D \cdot u; \quad x(0) = 0,$$

где  $A = -10$ ;  $B = 10$ ;  $C = 1$ ;  $D = 0$ . Такую структуру имеют модели судовых объектов и систем класса аperiodических звеньев, а именно: судовые объекты подогрева топлива на танкерах, системы и устройства утилизации тепловой энергии судовых энергетических установок; динамические звенья силовых электронных схем судовой автоматики и др.

Необходимо рассчитать вектор управления  $u(t)$ , обеспечивающий переход из состояния  $x(0)$  в заданное конечное состояние  $x(T)$  за минимальное время  $t = T$ . Управление  $u(t)$  ограничено. Диапазон изменений:  $0 \leq u(t) \leq U_k$ .

Решение этой задачи хорошо известно. Мы же получим решение с помощью линейного программирования. Ленточный алгоритм реализован в файле, составленном в кодах MATLAB:

```
% Линейное программирование.
% Исходные данные:
delt=0.0001; k=3000;
A=-10;B=10;
a=exp(A*delt); b=-(1-exp(A*delt))*inv(A)*B;
lvb=zeros(k+1,0); uvb=[];
% Определение оптимальных управлений для пяти режимов:
for i=1:5;
Uk=[50 75 150 200 250]';
Uk=Uk(i);
k1=0:k;
Хуцт=[25 65 120 170 220];
```

```

Xyct=Xyct(i);
lvb=zeros(k+1,1); uvb=[0;ones(k,1)]*Xyct;
flp=-ones(1,k+1);
m1=ones(1,k);
Ac=diag(m1,1);
Bc=diag([0 ones(1,k-1)*(-a) 0]);
ABc=Ac+Bc;
% Ограничения — неравенства:
Alp=ABc(1:k,:);
Blp=ones(k,1)*b*Uk;
% Применение функцииlinprog:
[x,J]=linprog(flp,Alp,Blp,[],[],lvb,uvb);
Ulp=Alp*x./b;
% Графические построения:
t=0:k;
plot(t*delt,x',t(1:k)*delt,Ulp),grid
axis([0 3000*delt 0 280])
hold on
end
hold off

```

В разделе файла «Линейное программирование» вычисляются  $a$  и  $b$  для перехода от непрерывной модели к дискретной с шагом  $delt$ . Затем в цикле производятся вычисления пяти режимов, оптимальных по быстродействию, с различными максимальными величинами сигналов управления и установившимися значениями переменной состояния. Эти величины представлены соответственно векторами

$$U_k=[50 \ 75 \ 150 \ 200 \ 250]' \quad \text{и} \quad X_{yct}=[25 \ 65 \ 120 \ 170 \ 220].$$

Устанавливаются верхняя и нижняя границы в виде векторов  $lvb$  и  $uvb$ . Согласно ленточной схеме, определяются матрицы ограничений-неравенств, после чего используется функция *linprog* для поиска оптимальных решений. Основной частью файла является процесс формирования блочной матрицы в виде структуры  $Alp$  и  $Blp$  высокой размерности. Для выполнения графических построений пяти режимов на одной плоскости вводится оператор *hold on* с последующей его отменой с помощью оператора *hold off* по завершении цикла.

На рис. 2 представлены оптимальные (по быстродействию) переходные процессы в рассматриваемой модели с различными  $U_k$  и  $X_{yct}$ .

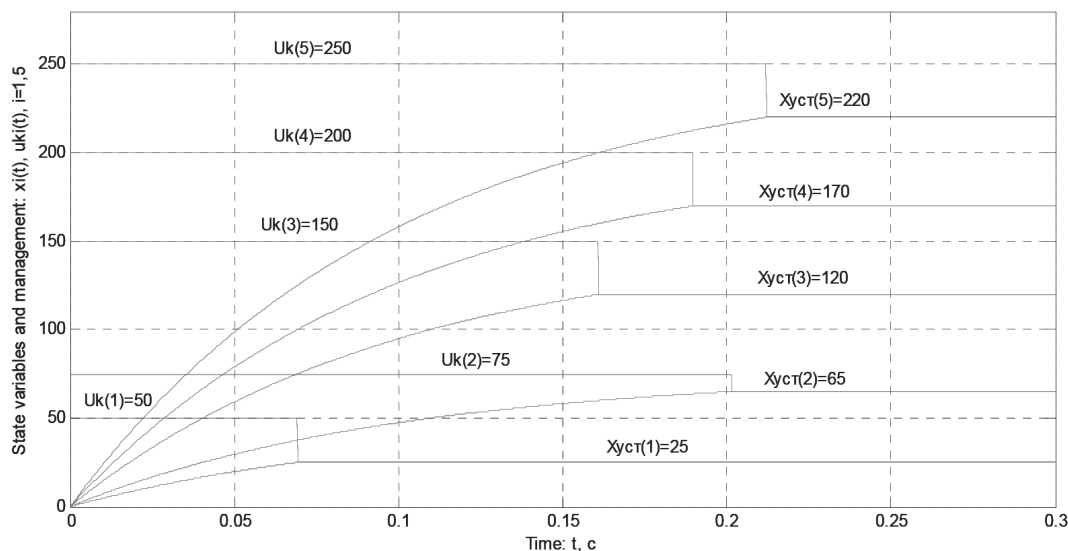


Рис. 2. Оптимальные по быстродействию переходные процессы в судовой динамической системе

**Обсуждение основных результатов.** В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритмов синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с использованием функций линейного и нелинейного программирования, что позволяет, в отличие от существующих методов синтеза быстродействующих систем, получить численный алгоритм оптимизации с использованием ленточной структуры дискретных динамических ограничений. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

Результаты расчета переменных состояния и управления, полученные методами линейного и нелинейного программирования, соответствуют оптимальным (по быстродействию) переходным процессам в рассматриваемых моделях судового объекта при переводе его из начального состояния в установившееся состояние за минимальное время. На графиках (рис. 1 и рис. 2) показаны моменты переключения, отражающие специфику объекта, из которых следует, что время переходного процесса зависит от численных значений параметров модели, а также от максимальных величин сигнала управления и установившихся значений переменных состояния.

**Заключительная часть.** Предложенные алгоритмы численной оптимизации могут эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме, где необходимо для получения решения использовать численные методы практической оптимизации. Алгоритмы оптимизации судовых объектов и систем средствами математического программирования содержат модели динамических объектов в форме уравнений в пространстве состояний, которые образуют систему ограничений на каждом шаге итерационного процесса, представленных ленточными матрицами в терминах математического программирования. Применение методов нелинейного программирования для решения задач оптимизации технологических процессов на судах образует широкий спектр алгоритмов и программ, пригодных для реализации технологий энергосбережения средствами автоматизации. Средства ЛП эффективно использовать в тех случаях, когда переменные состояния и управления в условиях ограничений не принимают отрицательных значений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
2. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
3. Андрианов Е. Н. Диагностирование рабочего процесса судового дизеля по эталонным моделям с применением вейвлетов / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 46–54.
4. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования динамической системы / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 56а–66.
5. Голубев П. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на судах и управления судовыми техническими средствами: дис... канд. техн. наук / П. В. Голубев. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 213 с.
6. Голубев П. В. Информационное обеспечение, моделирование и оптимизация корпоративной структуры специализированного порта / П. В. Голубев, В. И. Королев, В. В. Сахаров // Труды института системного анализа Российской академии наук. — 2005. — Т. 17. — С. 222–235.
7. Чертков А. А. Оптимизация разовых выплат по кредитам при обновлении флота / А. А. Чертков, Д. А. Загребин, Ю. Б. Михайлов // Морской вестник. — 2014. — № 2 (50). — С. 109–111.
8. Мирошник И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 550 с.

9. Севрюков А. С. Информационная поддержка и алгоритм синтеза динамической системы управления методом нелинейного программирования / А. С. Севрюков, П. В. Голубев, С. А. Лутков // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2005. — № 1. — С. 134–139.
10. Cannon M. Efficient nonlinear model predictive control algorithms / M. Cannon // Annual Reviews in Control. — 2004. — Vol. 28. — Is. 2. — Pp. 229–237. DOI:10.1016/j.arcontrol.2004.05.001
11. Дивеев А. И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями / А. И. Дивеев // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2012. — № 2. — С. 63.
12. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.

## ALGORITHMIC AND SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS OF SHIP DYNAMIC OBJECTS BY MEANS OF MATHEMATICAL PROGRAMMING

*Modern means of mathematical programming and operations research are a powerful mechanism for improving ship control systems of dynamic objects and systems, ways of algorithmization and their synthesis on a new level. An optimal system can be taken as a benchmark to strive for when creating real systems. However, despite a wide range of scientific publications in the subject area, are still not fully resolved the issues of creating algorithms and software tools for effective application of numerical methods of optimization of technological processes on objects of water transport with due scientific justification. An important class of control systems is systems that provide maximum performance, allowing you to reduce the time of transient processes and, consequently, improve the performance of ship dynamic objects and systems of different purposes. The paper presents algorithms of synthesis of optimal control systems by using linear programming and nonlinear functions — solvers fmincon, which allows, in contrast to existing methods for the synthesis of high-speed systems, to obtain a numerical optimization algorithm using band structure discrete dynamic constraints. The correctness of the proposed technical solutions is demonstrated on examples of calculation of optimal trajectories of dynamic objects.*

*Keywords: algorithms, synthesis, ship dynamic objects, discrete systems, control performance, mathematical programming, functions, solvers, band structure of matrices of constraint inequalities, quality criteria.*

## REFERENCES

1. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. SPb.: FGBOU VO «Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova», 2015.
2. Saharov, V. V., A. G. Taranin, and A. A. Chertkov. “Energoefficient ship steering control algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
3. Andrianov, E. N., V. V. Saharov, and A. G. Taranin. “Ship diesel working process diagnosing with standard models and wavelet techniques applications.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 46–54.
4. Andrianov, E. N., V. V. Saharov, and A. G. Taranin. “Modally damped parametric method for ship constructions.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2012): 56a–66.
5. Golubev, P. V. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na sudah i upravleniya sudovymi tehničeskimi sredstvami*. Diss. SPb.: SPGUWC, 2010.
6. Golubev, P. V., V. I. Korolev, and V. V. Saharov. “Informacionnoe obespechenie, modelirovanie i optimizacija korporativnoj struktury specializirovannogo porta.” *Trudy instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk (ISA RAN)* 17 (2005): 222–235.
7. Chertkov, A. A., D. A. Zagredinov, and Ju. B. Mihajlov. “Optimization of single payments on loans when upgrading fleet.” *Morskoy Vestnik* 2(50) (2014): 109–111.
8. Miroshnik, I. V., V. O. Nikiforov, and A. L. Fradkov. *Nelineynoe i adaptivnoe upravlenie slojnymi dinamicheskimi sistemami*. SPb.: Nauka, 2000.

9. Sevrjukov A. S., P. V. Golubey, and S. A. Lutkov. "Informacionnaja podderzhka i algoritm sinteza dinamicheskoy sistemy upravleniya metodom nelinejnogo programmirovaniya." *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Informacionnye tehnologii i sistemy (Upravlenie, jekonomika, transport)*. SPb.: ООО «Andreevskij izdatelskij dom», 2005: 134–139.

10. Cannon, M. "Efficient nonlinear model predictive control algorithms." *Annual Reviews in Control* 28.2 (2004): 229–237. DOI:10.1016/j.arcontrol.2004.05.001.

11. Diveev, A. I. "A numerical method for network operator for synthesis of a control system with uncertain initial values." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 51.2 (2012): 228–243.

12. Djakonov, V. P., and V. V. Kruglov. *Matematicheskie pakety rasshirenija MATLAB: Specialny spravochnik*. SPb.: Piter, 2001.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
\_saharov\_@rambler.ru

Чертков Александр Александрович —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
chertkov51@mail.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант.  
Научный руководитель:  
Сахаров Владимир Васильевич.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
kaf\_osnpr@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
\_saharov\_@rambler.ru

Chertkov Alexandr Alexandrovich —  
PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
chertkov51@mail.ru

Saburov Sergey Valerevich — Postgraduate.  
Supervisor:  
Saharov Vladimir Vasilevich.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
kfspguvk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 г.

УДК 681.51

А. А. Дыда,  
Е. Б. Осокина,  
П. А. Дыда

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

В настоящей работе представлен подход к построению и оптимизации линейных регуляторов системы управления курсом судна, гарантирующих её робастные свойства с заданным качеством переходных процессов. Для оценки переходных процессов в системе управления используется показатель степени устойчивости. Особенностью математической модели судна является интервальная неопределённость её параметров, связанная с режимом его движения. Теоретической основой для построения системы управления, малочувствительной к вариациям параметров судна, является теорема В. Л. Харитонова. Показано, что оптимизация робастных регуляторов по критерию степени устойчивости сводится к стандартной задаче нелинейного программирования. Предложена методика параметрической оптимизации робастных регуляторов в системе управления линейным динамическим объектом. Приводятся результаты математического моделирования синтезированной робастной системы управления курсом судна.

Ключевые слова: управление судном, модель Номото 1-го порядка, робастность, степень устойчивости, интервальные параметры.

## Введение

При построении систем автоматического управления, в частности — систем управления курсом судна, предъявляются определённые требования к качеству переходных процессов. Как правило, синтез регуляторов подобных систем основан на применении упрощённых математических моделей, описываемых линейными стационарными дифференциальными уравнениями [1]. Однако в различных режимах эксплуатации судна параметры, характеризующие его поворотливость и инерционные свойства, изменяются в достаточно широких пределах [2]. Поэтому более адекватной представляется модель, в которой параметры являются интервальными значениями [3], [4]. В работе ставится задача параметрического синтеза традиционно используемых линейных регуляторов, обеспечивающих заданное качество процессов управления при произвольных значениях параметров судна в допустимой области [5]. Для оценки качества переходных процессов в системе используется показатель степени устойчивости [1], [6], [7].

## Модель судна и робастная устойчивость системы

Для иллюстрации подхода, предлагаемого в настоящей работе, рассмотрим простую математическую модель судна, известную как модель Номото 1-го порядка [7], [8]. Для определённости выберем типовой ПИД-регулятор. В этом случае математическая модель системы управления описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T\ddot{x} + [1 + Tk_c k_d]\dot{x} + k_c k_p x = 0, \quad (1)$$

где  $x(t)$  — курс судна;  $T$  и  $k_c$  — параметры судна, имеющие интервальный характер;  $k_d$ ,  $k_i$ ,  $k_p$  — параметры регулятора.

Предположим, что степень устойчивости системы управления [9] – [11] равна  $\alpha$ . Введём дополнительную переменную  $y(t)$  в соответствии с выражением

$$x = ye^{-\alpha t}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в модель (1), получаем следующее дифференциальное уравнение для функции  $y(t)$ :

$$T\ddot{y} + (1 + k_c k_d - 3T\alpha)\dot{y} + (k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2)y + ([1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3)y = 0. \quad (3)$$

При робастной устойчивости уравнения (3) по переменной  $y(t)$  очевидно, что для процессов  $x(t)$  гарантируется степень устойчивости  $\alpha$ . Введём обозначения для коэффициентов дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= T; \\ \alpha_1 &= 1 + k_c k_d - 3T\alpha; \\ \alpha_2 &= k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2; \\ \alpha_3 &= [1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3. \end{aligned}$$

Для выяснения условий робастной устойчивости дифференциального уравнения (3) воспользуемся *теоремой Харитонова*. В общем случае теорема Харитонова требует проверки устойчивости четырёх характеристических полиномов с коэффициентами, принимающими граничные значения. В рассматриваемом нами случае достаточно проверки устойчивости одного полинома  $P_1(s)$ :

$$P_1(s) = \overline{a_0}s^3 + \underline{a_1}s^2 + \underline{a_2}s + \overline{a_3},$$

где верхнее и нижнее подчёркивание соответствует максимальному и минимальному значению коэффициента. Для принятых интервальных параметров вычислим необходимые значения коэффициентов:

$$\overline{a_0} = T_{\max};$$

$$\overline{a_1} = ([1 + k_c k_d] - 3T\alpha)_{\min} = 1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max};$$

$$\overline{a_2} = (k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2)_{\min} = k_{c\min} k_p - 2\alpha k_{c\max} k_d - 2\alpha + 3T_{\min} \alpha^2;$$

$$\overline{a_3} = ([1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3)_{\max} = \alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}.$$

Согласно критерию Гурвица, полином  $P_1(s)$  будет робастно устойчивым, если соответствующие определители являются положительными. Составим матрицу Гурвица и запишем определители Гурвица для принятых выше интервальных параметров:

$$\Delta_1 = 1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max};$$

$$\Delta_2 = ([1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max}] \cdot [k_{c\min} k_p - 2\alpha k_{c\max} k_d - 2\alpha + 3T_{\min} \alpha^2]) - (T_{\max} [\alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}]);$$

$$\Delta_3 = \Delta_2 (\alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}).$$

В качестве примера примем интервальные параметры математической модели судна типа «Архангельск»:

$$T = [16; 25];$$

$$k_c = [0,036; 0,0545].$$

Задавшись для определённости степенью устойчивости  $\alpha = 0,008(\text{с}^{-1})$  и параметрами регулятора  $k_p = 0,9$ ;  $k_i = 0,003$ ;  $k_d = 0,7$ , получаем следующие значения определителей Гурвица:

$$\Delta_1 = 0,425 > 0;$$

$$\Delta_2 = 0,008 > 0;$$

$$\Delta_3 = 0,0000006 > 0.$$

Следовательно, уравнение (3) для переменной  $y(t)$  является робастно устойчивым, что определяет, в свою очередь, робастную устойчивость уравнения (1) с выбранным показателем качества  $\alpha$ .

#### *Параметрический синтез и оптимизация робастного регулятора*

Нами были получены достаточные условия робастной устойчивости системы управления курсом судна, основанные на интервальной модели Номото 1-го порядка. Задача синтеза заключается в нахождении параметров выбранного регулятора. Анализ показывает, что эта задача сводится к стандартной задаче нелинейного программирования. При решении задачи максимизации степени устойчивости в качестве критерия оптимальности  $F$  следует выбрать сам параметр  $\alpha$ :

$$F = \alpha \rightarrow \max.$$

При постановке задачи обеспечения требуемой устойчивости  $\alpha_d$ , критерий оптимальности  $F$  следует выбрать в виде

$$F = (\alpha - \alpha_d)^2 \rightarrow \min.$$

Требование неотрицательности определителей, задаваемых теоремой Харитоновой, представляет собой набор ограничений, в общем случае описываемых нелинейными соотношениями. В настоящее время существует достаточно много программных сред, в которых такая задача может быть решена численными методами. Для решения поставленной задачи могут быть использованы вычислительные среды с функцией численной оптимизации, которая позволяет предложить следующую методику параметрического синтеза робастных регуляторов на основе интервальных моделей.

1. На лист электронной таблицы заносятся граничные значения интервальных параметров выбранной модели управляемого объекта.

2. Задаются начальные значения параметров регулятора выбранного типа, которые далее будут оптимизироваться.

3. В целевую ячейку вносится выражение, определяющее оптимизируемую функцию.
4. Указываются изменяемые переменные, представляющие собой параметры регулятора и степень устойчивости.
5. Вносятся ограничения, выражающие требования положительности определителей матрицы Гурвица, составленной из коэффициентов полиномов Харитонова.
6. Выполняется численная оптимизация.

Для приведённой модели результаты оптимального параметрического синтеза по предложенной выше методике, представлены в таблице.

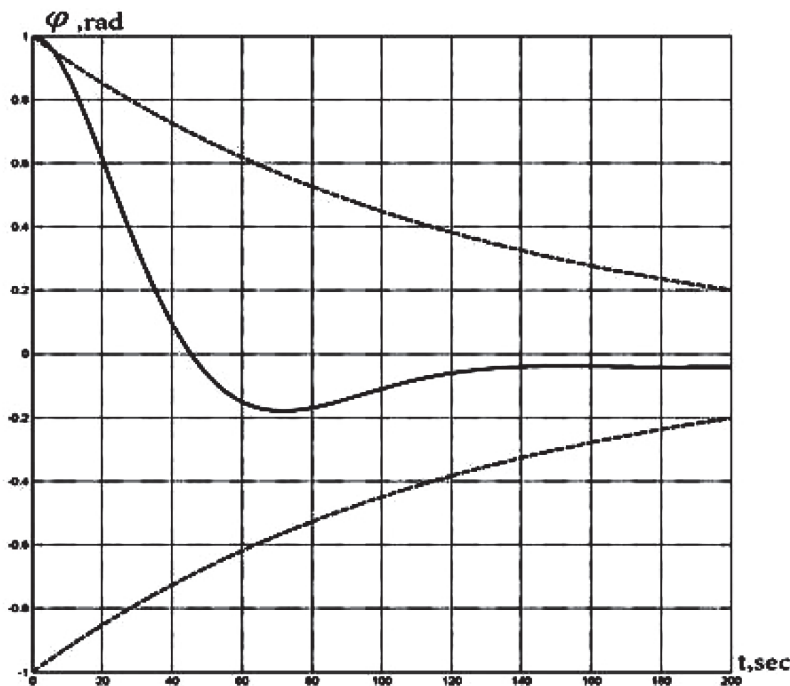
**Результаты синтеза**

| Параметры судна                                |            |                         |            | Синтезированные параметры ПИД-регулятора |       |        | Оптимизированная степень устойчивости, [с <sup>-1</sup> ] |
|------------------------------------------------|------------|-------------------------|------------|------------------------------------------|-------|--------|-----------------------------------------------------------|
| Коэффициент поворотливости, [с <sup>-1</sup> ] |            | Постоянная времени, [с] |            | $K_d$                                    | $K_p$ | $K_i$  | $\alpha$                                                  |
| $K_{\min}$                                     | $K_{\max}$ | $T_{\min}$              | $T_{\max}$ |                                          |       |        |                                                           |
| 0,036                                          | 0,054      | 16                      | 25         | 0,7                                      | 0,5   | 0,0003 | 0,008                                                     |

При необходимости могут быть введены дополнительные ограничения, исходя из возможностей практической реализации, например — для коэффициентов передачи регуляторов.

### Математическое моделирование

Для оценки результатов синтеза было проведено моделирование систем управления при различных сочетаниях граничных значений интервальных параметров, которое подтвердило, что регулятор с выбранным коэффициентом передачи обеспечивает максимальную гарантированную степень устойчивости  $\alpha$ . На рисунке приведен пример переходного процесса при параметрах модели  $T = T_{\min}$ ;  $k = k_{\max}$ . Пунктиром на рисунке обозначена область процессов, соответствующая оптимизированному значению  $\alpha$ .



Процесс  $x(t)$  в системе управления с ПИД-регулятором при  $T_{\min} = 16$  с;  $k_{\max} = 0,0545$  с<sup>-1</sup>;  $\alpha = 0,008$

Моделирование также показывает, что при других возможных сочетаниях параметров модели процессы остаются в указанной области.

## Выводы

Таким образом, в работе, на основе систематического применения теоремы Харитоновой, развивается подход к синтезу традиционных линейных регуляторов, которые обеспечивают требуемое качество процессов в системе управления курсом судна. Особенность предложенного подхода к параметрическому синтезу регуляторов заключается в том, что введение дополнительной переменной позволяет получить вспомогательное дифференциальное уравнение, робастная устойчивость которого гарантирует желаемое качество переходных процессов в исходной системе управления. Кроме того, показано, задача параметрического синтеза линейных робастных регуляторов при надлежащем выборе критерия оптимальности фактически представляет собой традиционную задачу нелинейного программирования с ограничениями, задаваемыми определителями Гурвица. Результаты численного моделирования синтезированных регуляторов подтвердили справедливость полученных соотношений и предложенной методики синтеза.

Очевидно, что этот подход может быть распространён на линейные модели судна более высокого порядка и в целом на произвольные линейные динамические объекты. Возможности современных вычислительных сред позволяют существенно упростить решение рассмотренной задачи параметрического синтеза линейных регуляторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов / 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2004. — 747 с.
2. Оськин Д. А. Анализ математических моделей морских судов для задач управления движением / Д. А. Оськин, В. В. Глазунов, С. А. Воробьёва // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 96–99.
3. Осокина Е. Б. Интервальный подход к моделированию динамики морских подвижных объектов / Е. Б. Осокина // Вестник Морского государственного университета. — 2015. — № 60. — С. 71–73.
4. Оськин Д. А. Перспективы применения адаптивных регуляторов в современных системах управления движением морских судов / Д. А. Оськин, В. В. Глазунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 99–102.
5. Осокина Е. Б. Построение робастных систем управления курсом судна по критерию степени устойчивости / Е. Б. Осокина // FEBRAT-15: сб. материалов XI междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока». — Владивосток: Морской гос. ун-т, 2015. — С. 155–157.
6. Оськин Д. А. Синтез робастных регуляторов на основе степени устойчивости системы управления курсом судна / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, Е. А. Константинова, А. А. Дыда // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 2. — С. 106–109.
7. Осокина Е. Б. Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей / Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин, А. А. Дыда // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 24–31.
8. Amerongen J. Adaptive Steering of Ship: PhD thesis / J. van Amerongen. — Delft University of Technology, 2005. — 156 p.
9. Шубладзе А. М. Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при ПИД управлении: в 2 ч. / А. М. Шубладзе, В. Е. Попадью, А. А. Якушева, С. И. Кузнецов // Управление большими системами: сб. тр. — 2008. — № 22. — Ч. 1. — С. 86–100.
10. Пушкарев М. И. Синтез робастного регулятора по критерию максимальной степени устойчивости на основе интервальных коэффициентов характеристического полинома / М. И. Пушкарев, С. А. Гайворонский // Решетниковские чтения. — 2011. — Т. 2. — № 15. — С. 496–497.
11. Пушкарев М. И. Параметрический синтез робастного регулятора, обеспечивающего квазimaxимальную степень устойчивости интервальной системы / М. И. Пушкарев, С. А. Гайворонский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2012. — № 2-1 (26). — С. 162–165.

## PARAMETER OPTIMIZATION OF ROBUST REGULATOR FOR SHIP CONTROL SYSTEM

*The paper presents an approach to design and optimization of linear regulators in ship course control system which guaranties its robust properties with prescribed quality of transitional processes. To evaluate system*

transients, a degree of stability is used. A feature of ship mathematical model consists in interval uncertainty of its parameters correlated with ship movement regime. Theoretical basis for control system design which provides low sensibility with respect to ship parameter variations is Kharitonov's theorem. It is shown that robust regulator parameters optimization with stability degree criterion is reduced to a standard problem of nonlinear programming. A methodology of robust regulator parameters optimization is proposed. Mathematical modeling results designed robust control system is given.

**Keywords:** ship control, Nomoto's models, robustness, stability degree, interval parameters.

## REFERENCES

1. Besekerskiy, V. A., and E. P. Popov. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*. SPb.: Izd-vo «Professija», 2004.
2. Os'kin, D. A., V. V. Glazunov, and S. A. Vorob'jova. "Sea ships mathematical models analysis for movement control problems." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2010): 96–99.
3. Osokina, E. B. "Intervalnyj podhod k modelirovaniyu dinamiki morskikh podvizhnykh obektov." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 60 (2015): 71–73.
4. Os'kin, D. A., and V. V. Glazunov. "Perspectives of adaptive regulators applications in modern control systems of sea ships movement." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2010): 99–102.
5. Osokina, E. B. "Postroenie robustnykh sistem upravleniya kursom sudna po kriteriju stepeni ustojchivosti." *FEBRAT-15: sbornik materialov odinnadcatoj mezhdunarodnoj nauch. prakt. konf. "Problemy transporta Dalnego Vostoka"*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2015: 155–157.
6. Os'kin, D. A., E. B. Osokina, E. A. Konstantinova, and A. A. Dyda. "Robust regulators synthesis based on stability degree of ship course control system." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2015): 106–109.
7. Osokina, E. B., A. A. Dyda, and D. A. Oskin. "Simple models based on adaptive identification of ship parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 24–31.
8. Shubladze, A. M., V. E. Popad'ko, A. A. Yakusheva, and S. I. Kuznecov. "PID controllers' stability degree optimization." *Large-scale Systems Control* 22 (2008): 86–100.
9. Amerongen, J. *Adaptive Steering of Ship*: PhD thesis. Delft University of Technology, 2005.
10. Pushkarev, M. I., and S. A. Gajvoronskiy. "Sintez robustnogo reguljatora po kriteriju maksimalnoj stepeni ustojchivosti na osnove intervalnykh koefitsientov harakteristicheskogo polinoma." *Reshetnikovskie chtenija* 2.15 (2011): 496–497.
11. Pushkarev, M. I., and S. A. Gajvoronskiy. "Parametricheskij sintez robustnogo reguljatora, obespechivajushhego kvazimaksimalnuju stepen ustojchivosti intervalnoj sistemy." *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki* 2-1(26) (2012): 162–165.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «МГУ имени  
адмирала Г. И. Невельского»  
adyda@mail.ru  
Осокина Елена Борисовна — доцент.  
ФГБОУ ВО «МГУ имени  
адмирала Г. И. Невельского»  
Olena1961@yandex.ru  
Дыда Павел Александрович — аспирант.  
Научный руководитель:  
Оськин Дмитрий Александрович —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «МГУ имени  
адмирала Г. И. Невельского»  
p.dyda@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dyda Alexander Alexandrovich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Maritime State University name  
after admiral G. I. Nevelskoy  
adyda@mail.ru  
Osokina Elena Borisovna — associate professor.  
Maritime State University name  
after admiral G. I. Nevelskoy  
Olena61@yandex.ru  
Dyda Paul Alexandrovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Oskin Dmitry Alexandrovich —  
PhD, associate professor.  
Maritime State University name  
after admiral G. I. Nevelskoy  
p.dyda@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2015 г.

## РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА В ПРОЦЕССЕ ПРОМЫСЛА

*В работе рассматривается компьютеризированная система обучения и тестирования (КСОТ), предназначенная для автоматизации процессов подготовки специалистов водного транспорта, которые осуществляют вылов. Система базируется на взаимодействии базы знаний изучаемой предметной области, накопленной в результате промысла, и методических знаний по управлению процессом подготовки специалистов тралового и кошелькового лова. Целью и задачей исследований является усовершенствование средств формализации знаний специалистов водного транспорта для тралового и кошелькового лова; формализация знаний о процессах подготовки специалистов водного транспорта для процессов лова; разработка математических моделей основных компонентов КСОТ и ее алгоритма управления. В работе использованы методы математического моделирования и формализации описания структур, теории множеств, графов, методы теории системного анализа сложных систем принятия решений. В результате проведенных исследований разработаны модели алгоритмов всех структурных элементов адаптивной КСОТ специалистов водного транспорта для процессов лова и для реализации адаптации КСОТ к общим и индивидуальным характеристикам специалистов водного транспорта; разработаны критерии классификации критических ситуаций в КСОТ и динамического выбора моделей специалистов водного транспорта.*

*Ключевые слова:* база знаний, предметная область, информационные технологии, дистанционное обучение, специалисты водного транспорта.

### Введение

В настоящее время в образовательных центрах ведущих стран мира ведутся поиски способов, методик и методов повышения эффективности и качества обучения, обеспечивающих для различных контингентов обучаемых поддержку их самостоятельной познавательной деятельности, компьютеризированного обучения, коллективного и индивидуального режимов решения учебных и практических задач. Требуется отметить, что комплексное обучение специалистов водного транспорта ориентировано больше на подготовку узких специальностей или получение сертификатов согласно конвенции. Вопросы обучения и подготовки персонала по траловому и кошельковому лову не осуществляются комплексно.

Возникли возможности повышения эффективности процесса обучения — использование новых информационных технологий для подготовки специалистов водного транспорта в процессе лова. Значительные достижения в области формального представления человеческих знаний с помощью теории и методов искусственного интеллекта и новых информационных технологий создают реальную основу для построения универсальных информационных систем. Эти системы способны накапливать учебный материал, методические знания лучших преподавателей и контролировать знания обучаемых. Лучшие образцы систем должны использовать результаты контроля знаний обучаемых для управления ходом процесса обучения, что активно применяется для классических методов подготовки специалистов. Под компьютеризированной системой обучения и тестирования (КСОТ) обучаемых будем понимать систему, предназначенную для автоматизации процессов обучения и тестирования, основанную на взаимодействии базы знаний (БЗ) изучаемой предметной области (БЗ ПрО), и методических знаний по управлению учебным процессом и качественной и количественной оценке (БЗ МО) знаний обучаемых. Все вышесказанное определяет актуальность задачи усовершенствования методов представления и измерения знаний в обучающих и тестирующих системах, разработки новых методик, методов, моделей и алгоритмов адаптивного управления процессом обучения и тестирования знаний.

## **Анализ результатов научных разработок в области современных технологий компьютеризированного обучения и контроля знаний**

С помощью компьютерных технологий акцент ставится не только на контроль усвоения знания, но и на приобретение знаний в процессе их конструирования. Речь идет не об усвоении готовых знаний, а об освоении способов получения знаний, исследовании информации и ее использовании для получения нового знания, что достаточно важно при подготовке специалиста водного транспорта. При этом совершенно не исключаются традиционные способы получения знания, а уравниваются процессы синтеза и анализа в образовательном процессе [1], [2].

Обычно при обучении используются следующие методы обучения: инструктивный (репродуктивная технология) — запоминание данных; параметрический метод — улучшение характеристик имеющихся знаний и навыков; алгоритмический — обучение алгоритмам решения различного рода задач; концептуальный — метод обучения построению новых концепций, направленный на развитие способностей обучаемых к самостоятельному познанию. Если совместить функции обучения, контроля и управления учебным процессом, то в результате можно получить универсальную адаптивную систему обучения и тестирования. В общем случае задача разработки КСОТ может быть сведена к разработке ряда моделей, описывающих отдельные стороны процесса обучения с помощью компьютеризированных систем обучения [3]. В основу технологии построения моделей положен метод поэтапной детализации и активизации знаний.

*Цель и задачи исследований* — усовершенствование средств формализации знаний о тестируемых; формализация знаний о процессах обучения и тестирования и оценка его результатов; разработка математических моделей основных компонентов КСОТ и ее алгоритма управления для подготовки специалиста водного транспорта. При построении компьютеризированных систем обучения и тестирования решаются следующие задачи: определяется содержание, разрабатываются структура и средства ведения БЗ системы тестирования; формируются БЗ обучающих курсов ПрО и задания для тестирования по ним обучаемых; разрабатываются модели элементов КСОТ: предметной области обучения, обучаемых, управления ходом процесса обучения и тестирования и алгоритмы управления системой; организуется процесс обучения и тестирования и анализируются его результаты в.

*Объектом исследования* являются процессы разработки моделей и алгоритмов обучения и контроля знаний обучаемых в компьютеризированных адаптивных системах обучения и тестирования специалистов водного транспорта в процессе лова.

*Предметом исследования* являются информационные технологии адаптивной компьютеризированной системы обучения и тестирования специалистов водного транспорта в процессе лова.

### **Материал и методы исследований**

Для формализации слабоструктурированных задач в работе использованы методы математического моделирования и формализации описания структур, теории множеств, графов, методы теории системного анализа сложных систем и принятия решений. Применение комбинации этих методов обеспечило высокую достоверность и обоснованность результатов работы и позволило получить ряд новых научных результатов.

В существующих системах используются различные математические аппараты, различные математические модели обучаемых, предметной области обучения и управления тестированием, что не позволяет объединять модели, создавать интегрированные модели процесса обучения и тестирования в единой КСОТ. Алгоритм идентификации интегрированной модели КСОТ представлена на рис. 1 в виде символов алгоритма.

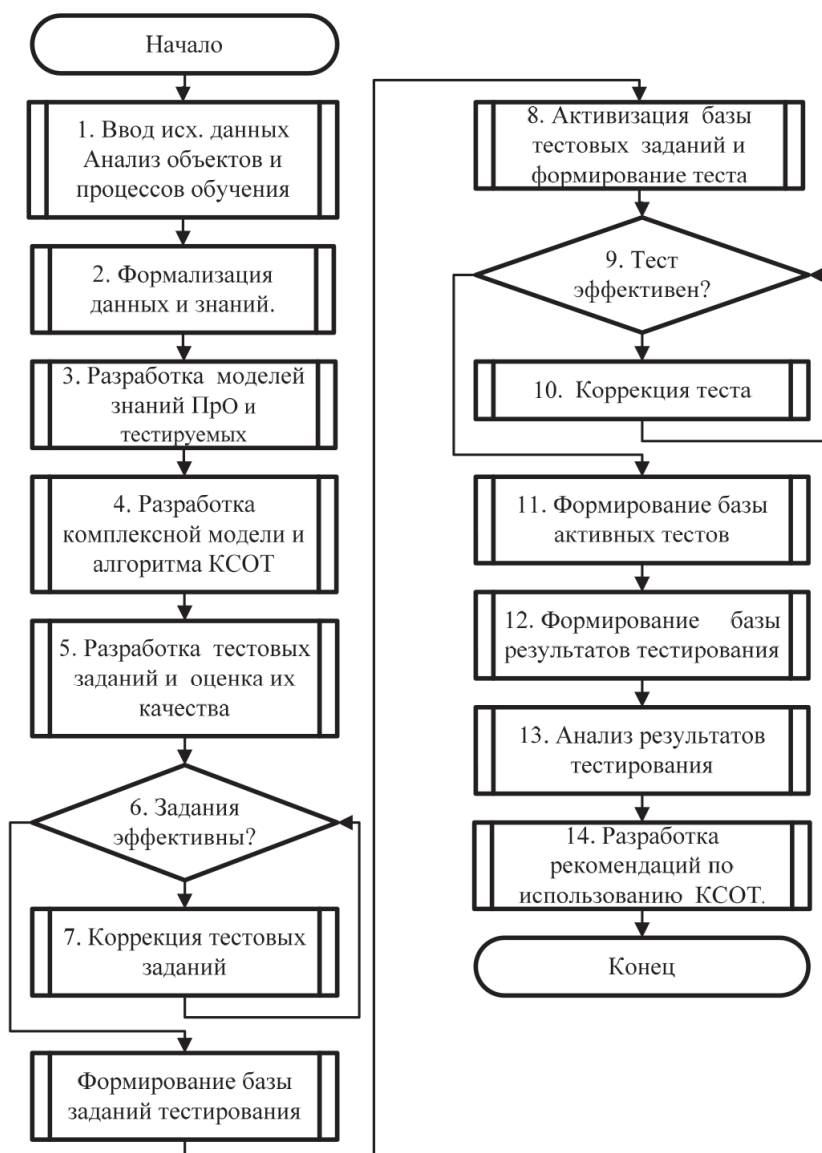


Рис. 1. Алгоритм КСОТ (компьютеризированной системы обучения и тестирования специалистов водного транспорта в процессе лова)

Процедура 1. Ввод исходных данных, структурный и функциональный анализ формализуемых процессов обучения и тестирования. Целью процедуры является выявление особенностей формализуемых процессов.

Процедура 2. Формализация данных и знаний. При формальном представлении знаний о предметной области должна учитываться ее количественная сторона в виде данных, так как понятие «знания» включает в себя понятие «данные», которые могут соответствовать множеству фактов и отношений между элементами, образующими эти факты [4]. Для унификации КСОТ модели объектов управления и предметной области обучения и тестирования специалистов водного транспорта в процессе лова должны обеспечивать представление знаний единым образом. Для этого очень хорошо подходят, как показано в [5], семантические сети знаний ПрО и БЗ МО. Представление знаний, базирующихся на аппарате семантических сетей, состоит в том, что предметная область рассматривается как совокупность объектов (сущностей, понятий) и связей (отношений) между ними [5]. Семантическая сеть — модель представления знаний посредством сети узлов, связанных дугами, где узлы соответствуют понятиям или объектам, а дуги — отношениям между узлами. Формально сетевые модели задаются в следующем виде:

$$H = \langle I, C_1, C_2, \dots, C_n, Q \rangle,$$

где  $I$  — множество информационных компонентов, хранящихся в узлах сети;  $C_1, C_2, \dots, C_n$  — типы связей между информационными элементами;  $Q$  — отображение, которое устанавливает соответствие между множеством типов связей и множеством информационных компонентов сети.

Преимуществами семантических сетей как средств представления знаний являются их большие выразительные возможности, естественность и наглядность системы знаний, представленной графически. Кроме того, аппарат семантических сетей имеет хорошо апробированную научную базу в виде теории графов.

Процедура 3. Разработка моделей знаний ПрО и тестируемых. Модели ПрО и тестируемых являются компонентами комплексной модели КСОТ. В качестве основы этих моделей компонентов КСОТ предлагается использовать семантические модели ПрО и модель процесса классификации обучаемых. Одна из основных целей обучения — это научить обучаемого использовать предоставленную информацию для решения конкретных задач или ситуаций, а базой для этого служат полученные знания, поэтому структуру ПрО КСОТ целесообразно описывать набором признаков, которые характеризуют каждый элемент знаний.

Одно из оснований классификации знаний в базе — это система учебных целей (знания и умения, которые должен приобрести обучаемый), которая составляет специальную часть знаний ПрО и занимает особое место среди других знаний. Учебные цели выступают в качестве признаков компонентов ПрО и взаимосвязь целей задается явно. Связи других компонентов определяются через их признаки — отношение к элементам системы целей.

Модель обучаемого является одной из базовых компонент компьютерных систем обучения. Она должна содержать достаточно полную информацию об обучаемом: уровень его знаний, умений и навыков, способность к обучению, способность выполнения заданий (умеет ли он использовать полученную информацию), личностные характеристики (тип, ориентация) и другие параметры. С точки зрения усвоения и освоения предметной области является уровень навыков и умений, который должен быть включен в модель обучаемого. Такие модели известны [6], но в данном случае модели тестируемых должны позволять организовывать адаптивное управление КСОТ, что требует их существенной доработки.

Процедура 4. Разработка комплексной модели и алгоритма функционирования КСОТ. Комплексная модель КСОТ строится на основе моделей ПрО, классификации тестируемых, компонентов системы управления тестированием и тестирования знаний предметной области обучаемыми. Это должна быть многоуровневая модель в виде функциональной семантической сети на верхнем уровне представления знаний и разветвленной системы тестирования, которая управляла бы выводом заключений на нижних уровнях модели тестирования знаний и обобщала результаты выводов всех уровней. Модель КСОТ, построенная на семантических сетях, должна иметь свою систему логического вывода, которая формирует заключения в соответствии с правилами, заложенными в алгоритм модели.

Процедура 5. Разработка тестовых заданий по учебной дисциплине. Основными требованиями, предъявляемыми к тестовым заданиям, являются: независимость заданий; простота и компактность формулировки вопросов; исключение неоднозначности понимания вопроса. В КСОТ при отборе информации для составления тестовых заданий должны быть учтены репрезентативность, комплексность, вариативность и системность содержания, ее соответствие цели тестирования, надежность теста [2]. Для расчета показателей эффективности теста строится матрица результатов тестирования, определяется трудность задания путем определения меры вариации тестовых баллов тестируемых [5]:

$$S = \sqrt{S_Y / N - 1}, \quad (1)$$

где  $N$  — число обучаемых;  $S_Y = \sum_{i=1}^N (Y_i - M_Y)^2$  — показатель вариации тестовых баллов по всем заданиям теста;  $M_Y$  — средний арифметический тестовый балл в данной группе обучаемых;  $Y_i$  — количество баллов, набранных обучаемым.

Процедуры 6 – 8. Проверка, удовлетворяют ли показатели соответствия тестовых заданий КСОТ заданным требованиям? Существует множество критериев соответствия. Считается, что наиболее эффективный подход к решению этой задачи состоит в построении системы оценки знаний обучаемых с использованием аппарата нечеткой логики [6]. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Существующие показатели соответствия тестовых заданий заданным требованиям не совсем точно определяют этот уровень. При тестировании знаний обучающихся в виртуальной системе часто приходится пользоваться понятием «нечетные знания», которые не могут быть интерпретированы как полностью логические — истинные и ложные. Существуют знания, которые выражаются промежуточными цифрами. Одно из главных понятий в нечеткой логике — понятие лингвистической переменной.

Нечеткое множество определяется совокупностью пар вида  $(x, \mu(x))$ , где  $x$  определен на базовой шкале  $B$  ( $x \in B$ ) и  $\mu(x)$  — функция принадлежности на интервале  $[0 \dots 1]$ . При определении набора критериев, их «весов», методы оценки решений могут быть разнообразными, поэтому в процессе обучения каждый вопрос должен иметь некоторый «вес» например, «очень сложный» ( $A$ ), «сложный» ( $B$ ), «средне сложный» ( $C$ ), «простой» ( $D$ ) и «очень простой» ( $G$ ). В таких системах обучения тестирование осуществляется с использованием базы данных контрольных вопросов и предполагаемых нечетких ответов. Здесь целесообразным является метод байесовских оценок сложности вопросов теста и определения сложности теста в целом. Применяя нечеткий классификатор Байеса к каждому вопросу, можно в интервале  $[0, 1]$  оценить степень принадлежности того или иного вопроса к одной из указанных категорий. Пусть  $A$  и  $B$  — нечеткие подмножества, тогда:

$$S(A, B) = \frac{M(A \cap B)}{M(A)}. \quad (2)$$

Теорема Байеса выводится из этого результата:

$$S(A, B) = \frac{S(B, A)M(B)}{M(A)};$$

$$M(A \cap B) = M(B)S(B, A). \quad (3)$$

Данная теорема приводит к определенно нечеткой теореме Байеса следующим образом. Пусть  $E$  — нечетное свидетельство и  $H_1 \dots H_k$  —  $k$  нечетких гипотез, тогда:

$$S(E, H_i) = \frac{S(H_i)M(H_i)}{\sum_{j=1}^K S(H_j, E)M(H_j)}, \quad i = 1, 2, \dots, K; \quad (4)$$

$$S(H_i, E) = 1 - \frac{\sum_X \max[0, \mu_{H_i}(X) - \mu_E(X)]}{M(H_i)}. \quad (5)$$

С помощью этой формулы определяется уровень сложности каждого вопроса, который, в свою очередь, позволяет четко оценить уровень знаний обучаемого по данному вопросу. В этом случае правильное расположение тестовых заданий в тесте повышает их валидность, поэтому тестовые задания должны располагаться в следующей последовательности: в начале расположены менее трудные тестовые задания, а затем — в порядке возрастания их сложности. Если в ходе апробации теста выяснится, что трудность многих его заданий не соответствует уровню знаний значительного количества обучающихся, то информация о знаниях конкретного обучаемого, получаемая по результатам выполнения отдельных тестовых заданий, может быть выражена формулой

$$I = \log_2 \frac{P_1}{P_0}, \quad (6)$$

где  $P_0$  — априорная вероятность успешного тестирования (этот показатель определяется до тестирования независимым экспертом (преподавателем));  $P_1$  — апостериорная вероятность успешного прохождения тестирования.

Если реальный уровень подготовленности обучаемого таков, что он априори успешно выполнит группу легких для него заданий, то выполнение данной группы заданий этим пользователем не дает дополнительной информации о его знаниях ( $P_0 \approx P_1$ ). Было бы целесообразно в этом случае усложнить задания, разбить задания на две или несколько групп по уровню сложности для разных обучаемых и реализовать гибкий механизм предъявления заданий, т. е. в процессе тестирования система должна адаптироваться к уровню знаний обучаемого. В случае если показатели эффективности тестовых заданий не удовлетворяют заданным требованиям, проводится коррекция заданий (процедура 7). Суть коррекции должна состоять в применении более валидных заданий, т. е. либо в их допустимом упрощении, либо усложнении. Затем формируется база тестовых заданий КСОТ (процедура 8).

Процедура 9. Активизация базы тестовых заданий и динамическое формирование теста по теме или разделу учебной дисциплины. При формировании адаптивной нейронной сети, [8] — [10], необходимо учитывать специфику заданий, поведение респондента и факторы внешнего воздействия.

Процедуры 10 – 12. Проверка соответствия динамически сформированного теста заданным показателям эффективности. Основными показателями эффективности теста являются валидность, надежность, шкалирование. Для расчета валидности формируются два теста, определяются доли аттестованных и не аттестованных тестирующихся и валидность определяется по формуле

$$V = \frac{(ad - bc)}{\sqrt{(a + c)(b + c)(a + d(b + d))}}, \quad (7)$$

где  $d$  — доля аттестованных обучаемых;  $a$  — доля не аттестованных обучаемых;  $b$  — доля аттестованных обучаемых в первом тесте и не аттестованных во втором;  $c$  — доля аттестованных обучаемых во втором тесте и не аттестованных в первом.

Доли вычисляются нормированием по количеству обучаемых, участвующих в тестировании:  $d = Nd / N$ ,  $Nd$  — количество аттестованных обучаемых;  $N$  — количество общее обучаемых, участвующих в тестировании. При этом  $V$  должно быть не меньше нуля. Отрицательные значения показывают, что тест плохой.

Оценка надежности теста производится путем расчета корреляции двух тестирующих наборов, где суммарный коэффициент надежности определяется по формуле

$$K_Y = \frac{N \sum_i x_i y_i - \left( \sum_i x_i \right) \left( \sum_i y_i \right)}{\sqrt{\left[ N \sum_i (x_i)^2 - \sum_i x_i \right] \left[ N \sum_i (y_i)^2 - \sum_i y_i \right]}}, \quad (8)$$

где  $X, Y$  — тестирующие наборы;  $x_i, y_i$  — элементы этих наборов.

Шкалирование заключается в переходе от обычных целочисленных баллов к произвольным с целью более полной дифференциации обучаемых. Для этого используются различные критериально-ориентированные шкалы.

Процедуры 13 – 14. Формирование базы результатов тестирования и анализ результатов тестирования соответственно. Анализ результатов тестирования по каждому из обучаемых и группе в целом позволяет скорректировать план занятия или учебный план дисциплины с целью повышения эффективности их поведения.

Процедура 15. Разработка рекомендаций по использованию КСОТ в учебном процессе. Разработка рекомендаций по использованию КСОТ в учебном процессе осуществляется при наборе достаточного опыта в применении либо после необходимого обучения КСОТ.

### Обсуждение результатов исследований

Рассмотрим разработанный алгоритм и построим модель адаптивной компьютеризированной системы обучения и тестирования добычи биоресурсов. Структура Про учебных дисциплин, алгоритмы САУ, классификации обучаемых, организации процесса обучения и контроля (текущего и рейтингового) разработаны как универсальные. В соответствии с изложенным, концептуальная модель адаптивной КСОТ включает ярусно-параллельный граф (рис. 2): модель предметной области; модель обучаемых; модель организации процесса обучения и тестирования знаний обучаемых; алгоритмы САУ и организации процесса обучения и тестирования. Основными элементами КСОТ, отличающимися от универсальных конкретными значениями, здесь будут являться наполнение модели Про учебной дисциплины и модели организации процесса обучения и тестирования знаний обучаемых. На начальном этапе построения КСОТ проводится анализ учебной программы и тематического плана учебной дисциплины для уяснения цели, существа материала и времени, отводимого на освоение дисциплины. Именно эти данные кладутся в основу построения моделей элементов и алгоритмов КСОТ. Разработаем модель предметной области учебных дисциплин КСОТ.

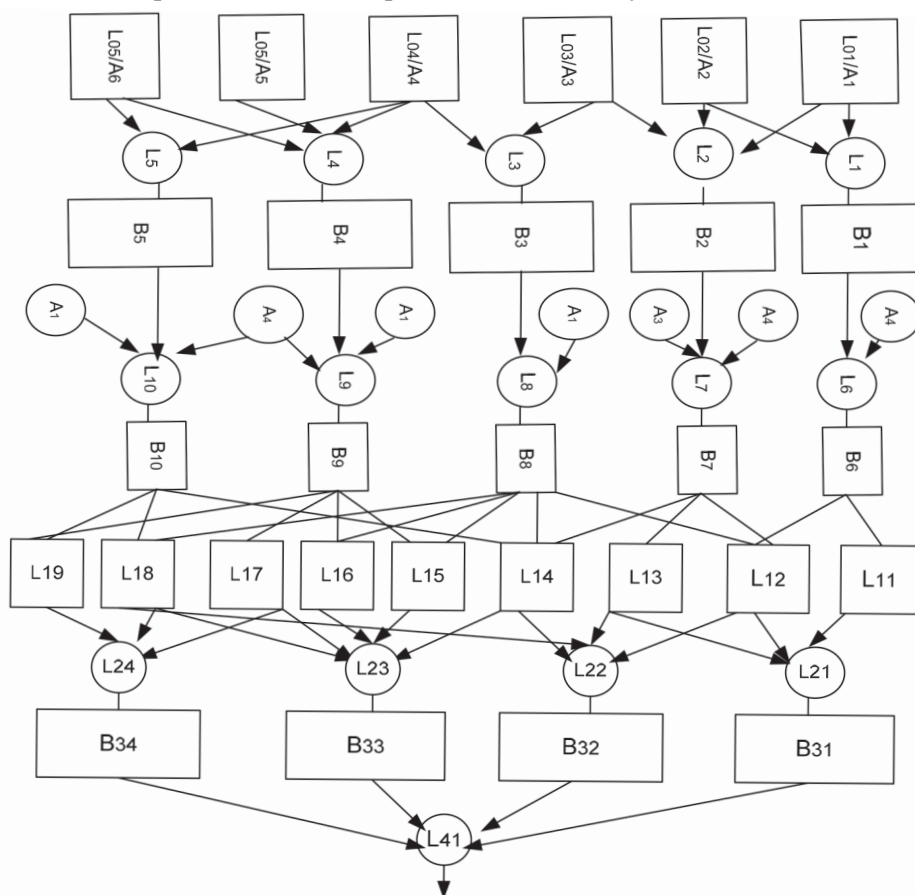


Рис. 2. Ярусно-параллельный граф дисциплины в КСОТ

### Модель предметной области учебной дисциплины КСОТ специалистов водного транспорта в процессе лова

Рассмотрим более подробно структуру предметной области КСОТ. Для модели предметной области КСОТ наиболее удобной и адекватной классическому построению учебного материала в компьютерных системах является семантическая сеть [7], [11]. Исходными данными для такой

сети являются данные по структуре источников учебно-методической литературы по дисциплинам обучения, а именно: количество разделов и тем в разделах учебной дисциплины, их тексты, графики и рисунки, гиперссылки и связи между ними. Учитывая иерархический характер построения учебного материала, его упорядоченность, формально такую информацию можно представить сетью, в вершинах которой находится текст или используется так называемая ярусно-параллельная форма графа знаний (ЯПГ). ЯПГ представляет собой именно смешанную модель знаний — потоковую и ярусную.

В соответствии с данными, структурой и порядком разработан и приведен на рис. 2 ярусно-параллельный граф изучения учебной дисциплины в КСОТ.

Здесь  $L01/A1 - L06/A6$  — исходные знания (начальные блоки информации) первого раздела учебной дисциплины»;

$L1 - L5, B1 - B5$  — промежуточные знания блоков первого раздела дисциплины (темы первого раздела);

$L6 - L10, B6 - B10$  — целевые знания блоков первого раздела дисциплины;

$L11 - L19$  — начальные знания блоков второго – пятого разделов дисциплины;

$L21 - L24, B31 - B34$  — целевые знания блоков второго – пятого разделов дисциплины;

$L41$  — целевые знания (блок) учебной дисциплины.

В соответствии с деревом знаний получены следующие формулы вывода для  $L$ -блоков первого раздела учебной дисциплины:

$$L1(A1 \& A2 \& A3) \rightarrow B1;$$

$$L2(A4 \& A5) \rightarrow B2;$$

$$L3(A6 \& A7) \rightarrow B3;$$

$$L4(A8 \& A9) \rightarrow B4;$$

$$L5(A10 \& A11) \rightarrow B5;$$

$$L6(A12 \& A13) \rightarrow B6 \quad L7(A14 \& A15 \& A16) \rightarrow B7;$$

$$L8(A17 \& A18) \rightarrow B8 \& B9;$$

$$L9(A19 \& A20 \& A21) \rightarrow B10 \quad L11(B1 \& B2 \& B3) \rightarrow B11;$$

$$L12(B1 \& B2 \& B4 \& B5 \& B6 \& B7) \rightarrow B12;$$

$$L13(B1 \& B2 \& B7 \& B8) \rightarrow B13;$$

$$L14(B2 \& B3 \& B9 \& B10) \rightarrow B14;$$

$$L15(B11 \& B12 \& B13 \& B14) \rightarrow B15.$$

Классификация обучаемых и тестовый контроль в процессе изучения первого раздела дисциплины обеспечивают управление КСОТ. Результаты изучения тем контролируются тестовым контролем  $СТК\ T1 - СТК\ T4$ , раздела  $СТК\ P1$  и анализируются алгоритмом управления для определения траектории дальнейшего движения обучаемых в сети КСОТ. Результаты тестирования также используются для формирования текущей и рейтинговой оценок обучаемых, но, в первую очередь, для адаптивного управления ходом процесса обучения и тестирования в ЭВМ обучаемых.

Аналогично строится структура моделей Про блоков знаний по разд. 2 – 5 учебной дисциплины.

### Выводы

Осуществлен анализ компьютерных обучающих систем и установлено, что многие из них либо не используют модели обучаемых вовсе, либо используют примитивные методы, что значительно снижает качество учебного процесса и не позволяет организовать его адаптивное управление для подготовки специалистов тралового и кошелькового лова.

При анализе современных систем обучения траловому и кошельковому лову, программных комплексов не было найдено, что говорит о перспективности исследования в данной области.

Установлено, что порядок построения материала дисциплины может быть потоковым и смешанным, т. е. представлен в строго последовательном (потоковом) и последовательно-параллельном виде для адаптации модели обучаемого.

Разработаны модели и алгоритмы всех структурных элементов адаптивной КСОТ учебных дисциплин, которые представлены процедурным типом.

Для реализации адаптации КСОТ к общим и индивидуальным характеристикам обучаемых применены методы адаптивного построения модели Про учебной дисциплины.

Разработаны критерии классификации критических ситуаций в КСОТ и динамического выбора моделей обучаемых на основании анализа индивидуальных априорных, текущих и апостериорных количественных и качественных параметров каждого из них (рассмотрены аспекты адаптации модели для специалистов водного транспорта).

По результатам тестирования тем и разделов учебной дисциплины в заданные моменты времени автоматически введено понятие идентификации изменения типа обучаемого и индивидуальная траектория его обучения. Тем самым осуществляется адаптация системы управления КСОТ к индивидуальным характеристикам специалистов водного транспорта, задействованных в процессе лова.

Разработаны общие рекомендации по построению и применению КСОТ в учебном процессе в виде адаптивного нейронного алгоритма, который выражен блоками унифицируемой модели обучаемого в сфере водного транспорта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаев Ф. Т. Виртуальное образование и оценка сложности теста в обучающих системах / Ф. Т. Агаев // Междунар. науч.-технич. конф. «Информационные системы в экономике, управлении производством и образовании». — Новосибирск, 2003. — Т. 1. — С. 10–13.
2. Андреев А. Б. Экспертная система анализа знаний / А. Б. Андреев, А. Н. Кузнецов, В. Б. Моисеев [и др.] // Открытое образование. — 2001. — № 2. — С. 47–52.
3. Башмаков И. А. Модель семантической сети для представления учебного материала в компьютерных обучающих средствах / И. А. Башмаков, П. Д. Рабинович // Справочник. Инженерный журнал. — 2002. — № 8. — С. 61–64.
4. Бобырь Е. И. Комплексная модель адаптивной компьютеризированной системы обучения и тестирования на базе семантических сетей / Е. И. Бобырь, Л. Н. Радванская, В. В. Мартынов, Ю. В. Чепурная // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2009. — № 1 (34). — С. 491–496.
5. Затхей В. А. Формально-логический аппарат представления знаний о процессах управления обучением в экспертных обучающих системах / В. А. Затхей, Н. В. Шаронова, И. Е. Лещенко // АСУ и приборы автоматики. — 2005. — № 130. — С. 52–56.
6. Чепурная Ю. В. Ситуационное управление в адаптивной компьютеризированной системе тестирования обучаемых / Ю. В. Чепурная // Экспертные оценки элементов учебного процесса: материалы XI межвуз. науч.-практ. конф. — Харьков: Народная украинская академия, 2009. — С. 65–66.
7. Широких Г. В. Моделирование процессов загруженности поступления информации на основе самообучающихся сетей / Г. В. Широких, С. Г. Черный // Информационные технологии моделирования и управления. — 2005. — № 2 (20). — С. 279–282.
8. Chernyi S. The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support / S. Chernyi // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. — Vol. 3. — Pp. 60–65.
9. Нырков А. П. Оценка надежности и эффективности распределенных систем буровых установок / А. П. Нырков, А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 6. — С. 51–53.
10. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 100. — Pp. 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490.

11. Некрасова А. А. Исследование возможности применения теории перколяции для управления потоками данных в информационных сетях на транспорте / А. А. Некрасова, С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 192–198.

## DEVELOPMENT OF ADAPTIVE COMPUTERIZED TRAINING SYSTEM OF SPECIALISTS OF WATER TRANSPORT IN THE PROCESS OF FISHING

*The paper deals with a computerized system of training and testing (CSTT), designed to automate the process of training specialists of water transport, which carry the catch. The system is based on the interaction of the knowledge base of the studied subject area accumulated as a result of fishing and methodical knowledge management process of preparation of experts trawl and purse seine fishing. The purpose and objective of research is to improve the means of formalization of knowledge of water transport specialists for trawling and purse seining; formalization of knowledge about the processes of preparation of water transport specialists for fishing processes; development of mathematical models of the main components CSTT and its control algorithm. We used mathematical modeling techniques and formalizing the description of the structures, the theory of sets, graphs, methods of system analysis of the theory of complex decision-making systems. The studies developed models of algorithms of all the structural elements of the adaptive CSTT water transport specialists for fishing processes; to implement adaptation CSTT shared and individual characteristics of specialists of water transport; developed criteria for the classification of critical situations in CSTT and dynamic models of water transport specialists.*

*Keywords: knowledge base, subject area, information technology, e-learning, specialists of water transport.*

### REFERENCES

1. Agaev, F. T. "Virtualnoe obrazovanie i ocenka slozhnosti testa v obuchajushhih sistemah." *Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Informacionnye sistemy v jekonomike, upravlenii proizvodstvom i obrazovanii"*. Vol. 1. Novosibirsk, 2003: C. 10–13.
2. Andreev, A. B., A. N. Kuznecov, V. B. Moiseev, V. V. Ushanov, and Ju. E. Usachev. "Jekspertnaja sistema analiza znanij." *Open Education 2* (2001): 47–52.
3. Bashmakov, I. A., and P. D. Rabinovich. "Model semanticheskoy seti dlja predstavlenija uchebnogo materiala v kompjuternyh obuchajushhih sredstvah." *HANDBOOK. An Engineering journal with appendix 8* (2002): 61–64.
4. Bobyr, E. I., L. N. Radvanskaja, V. V. Martynov, and Ju. V. Chepurnaja (Ju. V. Martynova). "Kompleksnaja model adaptivnoj kompjuterizirovannoj sistemy obucheniya i testirovaniya na baze semanticheskikh setej." *Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta* 1(34) (2009): 491–496.
5. Zathej, V. A., N. V. Sharonova, and I. E. Leshhenko. "Formalno-logicheskij apparat predstavlenija znanij o processah upravlenija obucheniem v jekspertnyh obuchajushhih sistemah." *ASU i pribory avtomatiki* 130 (2005): 52–56.
6. Chepurnaja, Ju. V. "Situacionnoe upravlenie v adaptivnoj kompjuterizirovannoj sisteme testirovaniya obuchaemyh." *Jekspertnye ocenki jelementov uchebnogo processa: materialy HI-oj mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* Harkov: Narodnaja ukrainskaja akademija, 2009: 65–66.
7. Shirokih, G. V., and S. G. Chernyj. "Modelirovanie processov zagruzhennosti postuplenija informacii na osnove samoobuchajushhihsja setej." *Informacionnye tehnologii modelirovaniya i upravleniya* 2(20) (2005): 279–282.
8. Chernyi, S. "The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support." *Metallurgical and Mining Industry* 3 (2015): 60–65.
9. Nyrkov, A. P., A. A. Zhilenkov, and S. G. Chernyj. "Ocenka nadezhnosti i jeffektivnosti raspredelennyh sistem burovyh ustanovok." *Avtomatizacija v promyshlennosti* 6 (2015): 51–53.
10. Zhilenkov, A., and S. Chernyi. "Investigation performance of marine equipment with specialized information technology." *Procedia Engineering* 100 (2015): 1247–1252. DOI:10.1016/j.proeng.2015.01.490
11. Nekrasova, A. A., and S. S. Sokolov. "Study of the possibility of percolation theory for flow control in information networks transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 192–198.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Сметух Надежда Павловна* — соискатель.  
Научный руководитель:  
*Черный Сергей Григорьевич* —  
кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «Керченский государственный  
морской технологический университет»  
*nadya.s.2011@yandex.ua*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Smetuh Nadezhda Pavlovna* — applicant.  
Supervisor:  
*Chernyi Sergey Grigorievich* —  
PhD, associate professor.  
Kerch State Maritime Technological University  
*nadya.s.2011@yandex.ua*

*Статья поступила в редакцию 19 апреля 2016 г.*

**УДК 004.421.2, 004.42, 004.055**

**В. Е. Марлей,  
Е. С. Федорина**

### **АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ПОТОКОВ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОРТА**

*Статья посвящена вопросам учёта, анализа и обработки данных о перегрузочных машинах в информационных системах морских (речных) портов. В качестве перегрузочных машин порта рассмотрены грузоподъёмные машины, машины непрерывного транспорта, внутривозводской транспорт и складские технологические машины. Рассмотрены понятия многокомпонентных потоков и долевого структур, приведены их описания. Рассмотрена модель взаимодействия многокомпонентных потоков на примере данных о перегрузочных машинах порта. Приведён алгоритм анализа и обработки данных об оборудовании порта на основе многокомпонентных потоков и долевого структур. Суть алгоритма заключается в подразделении данных на отдельные потоки в настоящий момент времени. Данные обрабатываются в каждом потоке в последующие моменты времени. На основе приведённого алгоритма написано пользовательское приложение для информационной системы порта.*

*Ключевые слова: информационная система, информационные потоки, анализ и обработка данных, многокомпонентные потоки, долевого структур.*

#### **Введение**

Современное техническое оснащение морских и речных портов, а также других объектов водного транспорта (ОВТ) невозможно представить без информационных систем (ИС), поскольку в портах и на других объектах воднотранспортной отрасли циркулирует огромное количество данных [1], [2]. В частности, для связи и информационной поддержки различных ОВТ (подвижных и неподвижных) используют распределённые информационные системы (РИС) [3]. Также на ОВТ используют автоматизированные информационные системы (АИС) [2]. ИС портов и других объектов воднотранспортной отрасли обрабатывают различные виды данных (фото- и видеоматериалы, звуковые сигналы с шумом и без и др.), в том числе и данные, представляющие собой сложные объекты. К таким данным относятся различные географические, пространственные, атрибутивные сведения о различных ОВТ. Географические и пространственные данные удобно хранить в геоинформационных системах (ГИС) [4], [5]. В отличие от атрибутивных («семантических») данных, которые можно описать реляционной моделью, географические и пространственные сведения описывают более сложными моделями организации данных, например, геореляционной [5]. Для эффективной работы с данными различных ИС воднотранспортной отрасли целесообразно подразделять все сведения, циркулирующие в ИС, на отдельные информационные потоки (ИП). Доктор технических наук, профессор Д. В. Ландэ занимается поиском и внедрением различных

методов и подходов к организации ИП, их анализу, обработке данных в ИП и другими видами работ с данными, его исследования отражены в работах [6] – [10]. В трудах [6] – [8] выделены тематические ИП и рассмотрены их модели, в работах [9], [10] предложены и применены методы и алгоритмы анализа для ИП. Д. В. Ландэ уделяет большое внимание внедрению различных методов и подходов для работы с ИП в различные сферы деятельности, в частности ИП используются для поиска ключевых слов и частоты упоминания в сети Интернет, ранжирования ссылок и других видов работ с данными. Для web-пространства Д. В. Ландэ предлагает рассматривать ИП в виде процесса, который реализует целочисленная неубывающая ступенчатая функция правого конца временного отрезка [6] – [8]. В отличие от web-пространства, информационным системам ОВТ приходится обрабатывать различные по сложности и структуре данные, поэтому будем рассматривать ИП в виде функциональной зависимости между количеством появившихся данных и определёнными моментами времени [1], [11].

Рассмотрим морские и речные порты как составляющие ОВТ. Важным направлением в организации работы морских и речных портов является учёт, анализ, обработка и другие манипуляции с данными, циркулирующими в ИС порта. Например, это данные о количестве, видах и состоянии оборудования порта. Поэтому актуальными задачами являются создание приложений, обрабатывающих и анализирующих данные, введённые сотрудниками порта, и анализ состояния оборудования для ИС ОВТ.

### Организация учёта, анализа и обработки сведений об оборудовании

Рассмотрим актуальную для ИС порта задачу организации учёта, анализа и обработки данных об оборудовании. В задаче будем рассматривать количественные и качественные данные об оборудовании. Целесообразно рассматривать такие данные как многокомпонентные потоки (МП) с определённым набором компонент и применять к ним элементы теории долевых структур (ДС) [12] – [14]. В рамках данной задачи будем считать каждое сведение об определённом виде оборудования отдельным компонентом. Долевой структурой  $D^n(B)$  называется дискретное конечное множество, задаваемое перечисление компонент [13]:

$$D^n(B) = \{d_1, \dots, d_n\}, \sum_{i=1}^n d_i = 1, \quad (1)$$

где  $n$  — число классов или длина долевой структуры;  $d_i$  — доля  $i$ -й компоненты.

Многокомпонентный поток  $\bar{B}$  опишем парой:

$$\bar{B} = (B, D^n(B)), \quad (2)$$

где  $B$  — суммарная величина всех составляющих многокомпонентного потока [14].

Возьмём простой случай этой задачи с небольшим набором компонент [12]. Введём следующие обозначения:

$B(t)$  — общее количество оборудования, которое было в порту к началу периода  $t$ ;

$W(t)$  — общее количество оборудования, которое было закуплено в порт в период  $t$ ;

$V(t)$  — общее количество оборудования, которое было списано из порта в период  $t$ ;

$B_i(t)$  —  $i$ -й компонент оборудования серии  $B(t)$ ;

$W_{iw}(t)$  —  $iw$ -й компонент оборудования закупленной в порт партии  $W(t)$ ;

$V_{iv}(t)$  —  $iv$ -й компонент списываемой партии оборудования  $V(t)$ .

Общее количество оборудования к началу периода  $(t + 1)$ :

$$B(t + 1) = B(t) + W(t) - V(t). \quad (3)$$

Формула  $i$ -й компоненты в  $B(t + 1)$ :

$$B_i(t + 1) = B_i(t) + W_{iw}(t) - V_{iv}(t). \quad (4)$$

Формулы нахождения  $B(t)$ ,  $W(t)$ ,  $V(t)$ :

$$B(t) = \sum_{i=1}^{i=n} B_i(t); \quad (5)$$

$$W(t) = \sum_{iw=1}^{iw=m} W_{iw}(t); \quad (6)$$

$$V(t) = \sum_{iv=1}^{iv=l} V_{iv}(t), \quad (7)$$

где  $n$  — число компонент серии  $B(t)$ ;  $m$  — число компонент закупленной в порт партии  $W(t)$ ;  $l$  — число компонент списываемой партии оборудования  $V(t)$ .

Математическая модель построена в абсолютных величинах. Необходимо найти определённые соотношения компонент МП.

В формуле (5) поделим все члены на  $B(t)$ , получим:

$$1 = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{B_i(t)}{B(t)}; \quad (8)$$

$$d_i^B(t) = \frac{B_i(t)}{B(t)}, \quad (9)$$

где  $d_i^B(t)$  — доля  $i$ -го компонента в  $B(t)$ , аналогично:

$$d_{iw}^W(t) = \frac{W_{iw}(t)}{W(t)}; \quad (10)$$

$$d_{iv}^V(t) = \frac{V_{iv}(t)}{V(t)}, \quad (11)$$

где  $d_{iw}^W(t)$  — доля  $i$ -го компонента в  $W(t)$ ,  $d_{iv}^V(t)$  — доля  $i$ -го компонента в  $V(t)$ .

Выведем формулу для  $i$ -й компоненты  $B(t+1)$ :

$$B(t+1) \cdot d_i(t+1) = B(t)d_i(t) + W(t)d_{iw}^W - V(t)d_{iv}^V(t); \quad (12)$$

$$(B(t) + W(t) - V(t))d_i(t+1) = B(t)d_i(t) + W(t)d_{iw}^W - V(t)d_{iv}^V(t). \quad (13)$$

В формуле (13) поделим правую и левую части на  $B(t)$ , получим:

$$\left(1 + \frac{W(t)}{B(t)} - \frac{V(t)}{B(t)}\right) \cdot d_i(t+1) = d_i(t) + \frac{W(t)}{B(t)}d_{iw}^W - \frac{V(t)}{B(t)}d_{iv}^V(t). \quad (14)$$

Введём следующие обозначения:

$$\frac{W(t)}{B(t)} = K_w(t), \quad \frac{V(t)}{B(t)} = K_v(t), \quad (15)$$

где  $K_w(t)$ ,  $K_v(t)$  — соотношения закупаемого  $W(t)$  списываемого  $V(t)$  оборудования относительно  $B(t)$ . Формула (14) примет следующий вид:

$$(1 + K_w(t) - K_v(t)) \cdot d_i(t+1) = d_i(t) + K_w(t)d_{iw}^W(t) - K_v(t)d_{iv}^V(t). \quad (16)$$

Доля  $i$ -й компоненты в  $B(t+1)$  равна

$$d_i(t+1) = \frac{d_i(t) + K_w(t)d_{iw}^W(t) - K_v(t)d_{iv}^V(t)}{1 + K_w(t) - K_v(t)}. \quad (17)$$

Формула (17) позволяет рассчитать доли  $i$ -ой компоненты в период  $(t+1)$  без использования абсолютных величин.

### Анализ и обработка данных о перегрузочных машинах порта

Рассмотрим задачу организации учёта, анализа и обработки данных об оборудовании на примере перегрузочных машин (ПМ) порта. Для решения этой задачи возьмём четыре вида перегрузочных машин и пронумеруем их:

- 1 — грузоподъёмные машины (ГПМ);
- 2 — машины непрерывного транспорта (МНТ);
- 3 — внутризаводской транспорт (ВЗТ);
- 4 — складские технологические машины (СТМ).

На рисунке приведено пользовательское приложение для работы с данными о перегрузочных машинах. Данные о начальном количестве видов ПМ вводятся сотрудниками порта.

**Учёт, анализ и обработка данных о перегрузочных машинах**

Виды перегрузочных машин (ПМ)

1 - грузоподъёмные машины (ГПМ)      3 - внутризаводской транспорт (ВЗТ)  
2 - машины непрерывного транспорта (МНТ)      4 - складские технологические машины (СТМ)

Количество ПМ к началу периода t

1 [26]    2 [32]    3 [22]    4 [29]    Рассчитать общее количество    109

Количество закупленных ПМ в период t

1 [12]    2 [11]    3 [15]    4 [26]    Рассчитать общее количество    64

Количество списанных ПМ в период t

1 [9]    2 [14]    3 [11]    4 [8]    Рассчитать общее количество    42

Общее количество оборудования к началу периода t+1    Рассчитать    131

Расчёт количества видов ПМ к началу периода t+1

Рассчитать    1 [29]    2 [29]    3 [26]    4 [47]

Нахождение определённых соотношений видов ПМ    Рассчитать

| Для ПМ к началу периода t | Для закупленных ПМ в период t | Для списанных ПМ в период t |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 [0,238532111048698]     | 1 [0,1875]                    | 1 [0,214285716414452]       |
| 2 [0,293577969074249]     | 2 [0,171875]                  | 2 [0,333333343267441]       |
| 3 [0,201834857463837]     | 3 [0,234375]                  | 3 [0,261904776096344]       |
| 4 [0,266055047512054]     | 4 [0,40625]                   | 4 [0,190476194024086]       |

Вычисление определённых соотношений видов ПМ в период t+1    Рассчитать

1 [0,221374049782753]    2 [0,221374034881592]    3 [0,198473274707794]    4 [0,3587786257267]

Программа для работы с данными о перегрузочных машинах порта

Эта программа позволяет провести количественный и качественный анализ данных о ПМ порта.

### Выводы

1. Рассмотрены некоторые виды информационных систем, которые могут использоваться на различных объектах водного транспорта.
2. Предложено подразделять данные со сложной структурой на отдельные ИП. Информационные потоки, содержащие в себе любое количество компонент, рассмотрены как многокомпонентные потоки. Даны определения ИП и МП применительно к задаче учёта и анализа данных. Рассмотрено понятие долевого структур.

3. Применены методы организации МП и элементы теории ДС к решению задачи организации учёта, анализа и обработки данных о перегрузочных машинах порта.

4. На основе задачи об организации учёта, анализа и обработки данных о ПМ написано пользовательское приложение для ИС порта. Программа предназначена для учёта, количественного и качественного анализа данных о различных перегрузочных машинах.

5. Разделение сведений на отдельные информационные и многокомпонентные потоки и применение к ним элементов теории долевых структур позволяют повысить качество работы с данными, скорость обращения к сведениям о различных объектах и эффективность работы информационных систем воднотранспортной отрасли. Элементы теорий МП и ДС могут быть применены к сведениям объектов водного транспорта для упрощения дальнейшей работы с данными и уменьшения затрат на организацию информационных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Б. Н. Применение методов анализа и обработки данных к информационным потокам объектов водного транспорта / Б. Н. Попов, Е. С. Федорина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 220–225.
2. Информационные технологии на водном транспорте [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/196877/> (дата обращения: 23.01.2016).
3. Распределенные информационные системы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.ict.nsc.ru/win/gis/publ/inf\\_sys.html](http://www.ict.nsc.ru/win/gis/publ/inf_sys.html) (дата обращения: 24.01.2016).
4. Разработка геоинформационных систем [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sovzond.ru/services/gis/> (дата обращения: 27.01.2016).
5. Попов Б. Н. Информационные потоки в Web-сервисах геоинформационных систем / Б. Н. Попов, Е. С. Федорина // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2014. — № 3. — С. 185–191.
6. Ландэ Д. В. Основы интеграции информационных потоков / Д. В. Ландэ. — Киев: Инжиниринг, 2006. — 240 с.
7. Ландэ Д. В. Моделирование динамики информационных потоков / Д. В. Ландэ // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 6–3. — С. 652–654.
8. Брайчевский С. М. Основы моделирования и оценки электронных информационных потоков / С. М. Брайчевский, А. Н. Григорьев, Д. В. Ландэ [и др.]. — Киев: Инжиниринг, 2006. — 176 с.
9. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. — Киев: Наукова Думка, 2011. — 256 с.
10. Безсуднов И. В. Интернетика. Навигация в сложных системах: модели и алгоритмы / И. В. Безсуднов, Д. В. Ландэ, А. А. Снарский. — М.: Либроком, 2009. — 264 с.
11. Попов Б. Н. Особенности некоторых математических моделей информационных потоков / Б. Н. Попов, Е. С. Федорина // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2014. — № 1 (12). — С. 60–65.
12. Марлей В. Е. Алгебра многокомпонентных потоков на основе долевых структур / В. Е. Марлей // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2009. — № 2. — С. 158–164.
13. Марлей В. Е. Долевые структуры и моделирование в относительных величинах / В. Е. Марлей // Тр. СПИИРАН. — 2005. — Т. 2. — № 2. — С. 94–100.
14. Марлей В. Е. Моделирование в относительных единицах, долевые структуры / В. Е. Марлей // Теория и практика системной динамики: тр. всероссийской конф. — Апатиты, 2004. — С. 20–26.

### ANALYSIS AND PROCESSING OF DATA FLOWS IN INFORMATION SYSTEM OF PORT

*The article is developed to question of accounting, analysis and processing of data about are reloaders in information systems of sea (river) ports. Hoisting machines, machines of continuous transport, inside factory*

transport, warehousing technology machine are considered as reloaders. Concepts of multicomponent flows and portions structure are considered and their descriptions are given. The model interaction of multicomponent flows for example of data about are reloaders of port is considered. The algorithm of analysis and processing of data about equipment of port based of multicomponent flows and portions structure is given. The gist of algorithm is concludes in subdivision of data on separate flows in present moment of time. Data is processing in every flow in subsequent moments of time. User application for information systems of port is written based of the algorithm.

**Keywords:** information system, information flows, analysis and processing of data, multicomponent flows, portions structure, user application.

## REFERENCES

1. Popov, B. N., and E. S. Fedorina. "Using of methods for analysis and processing data to an information flows for objects of water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2(30) (2015): 220–225.
2. Informacionnye tehnologii na vodnom transporte. Web. 23 Jan. 2016 <<http://www.myshared.ru/slide/196877/>>.
3. Rasprelennye informacionnye sistemy. Web. 24 Jan. 2016 <[http://www.ict.nsc.ru/win/gis/publ/inf\\_sys.html](http://www.ict.nsc.ru/win/gis/publ/inf_sys.html)>.
4. Razrabotka geoinformacionnyh sistem. Web. 27 Jan. 2016 <<http://sovzond.ru/services/gis/>>.
5. Popov, B. N., and E. S. Fedorina. "Information flows in Web services of geographic information systems." *Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo* 3 (2014): 185–191.
6. Landje, D. V. *Osnovy integracii informacionnyh potokov*. Kiev: Inzhiniring, 2006.
7. Landje, D. V. "Modeling the dynamics of information flows." *Fundamental research* 6-3 (2012): 652–654.
8. Brajchevskij, S. M., A. N. Grigorev, D. V. Landje, and V. N. Furashev. *Osnovy modelirovanija i ocenki jelektronnyh informacionnyh potokov*. Kiev: Inzhiniring, 2006.
9. Dodonov, A. G., and D. V. Landje. *Zhivuchest informacionnyh sistem*. Kiev: Naukova Dumka, 2011.
10. Bezsudnov, I. V., D. V. Landje, and A. A. Snarskij. *Internetika: Navigacija v slozhnyh sistemah: modeli i algoritmy*. M.: Librokom, 2009.
11. Popov, B. N., and E. S. Fedorina. "Features of some mathematical models of information flows." *Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo* 1(12) (2014): 60–65.
12. Marley, V. E. "The algebra of multicomponent flows based on portion structures." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2009): 158–164.
13. Marley, V. E. "The portion structure and modeling with using only ratio values." *SPIIRAS Proceedings* 2.2 (2005): 94–100.
14. Marley, V. E. "Modelirovanie v odnositelnyh edinicah, dolevye struktury." *Teorija i praktika sistemoj dinamiki: trudy Vserossijskoj konferencii*. Apatity, 2004: 20–26.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марлей Владимир Евгеньевич —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
[vmarley@rambler.ru](mailto:vmarley@rambler.ru)  
Федорина Елена Сергеевна — аспирант.  
Научный руководитель:  
Марлей Владимир Евгеньевич.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
[e.s.fedorina@mail.ru](mailto:e.s.fedorina@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marley Vladimir Evgenevich —  
Dr. of Technical Sciences, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
[vmarley@rambler.ru](mailto:vmarley@rambler.ru)  
Fedorina Elena Sergeevna — postgraduate.  
Supervisor:  
Marley Vladimir Evgenevich.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
[e.s.fedorina@mail.ru](mailto:e.s.fedorina@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2016 г.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЫ WEBOMETRICS КАК СРЕДСТВА СОДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕНИЮ НАУЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПРИСУТСТВИЯ УНИВЕРСИТЕТОВ В ИНТЕРНЕТЕ**

*В работе была исследована система Webometrics Ranking of World Universities, согласно которой два раза в год составляется мировой рейтинг университетов. В процессе исследования были рассмотрены методы и критерии оценки, а также способ ранжирования, выделены четыре основных web-индикатора, по которым проводится оценка и ранжирование. Сформулированы проблемы низких позиций российских вузов. Сделан обобщающий вывод по рассмотренным проблемам и предложенным мероприятиям для повышения позиций в рейтинговой системе Webometrics. Рассмотрен рейтинг лучших университетов мирового значения по версии британской консалтинговой компании Quacquarelli Symonds (QS)/QS World University Rankings и его ключевые показатели рейтингования. Научная новизна работы состоит в формировании практических рекомендаций по повышению позиций университета в рейтинге на примере ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова.*

*Ключевые слова: Webometrics Ranking of World Universities, QS World University Rankings, рейтинговые системы, научная активность университета, мировой рейтинг университета, российские образовательные организации, проект 5 – 100, результаты научной деятельности.*

### **Введение**

В процессе развития научно-образовательной среды под влиянием научно-технического прогресса, а также активной государственной политики в вопросах информационной открытости образовательных организаций университеты постепенно начали публиковать информацию о себе в интернет-пространстве. В связи с этим возникла необходимость составления рейтинга среди мировых университетов, которые позволяют по отдельным показателям проанализировать и объективно оценить активность образовательной организации в той или иной области.

Одной из таких рейтинг-систем является Webometrics Ranking of World Universities или Ranking Web of Universities (далее — Webometrics). Первоначальной целью Webometrics является содействие академической открытости или повышению веб-присутствия образовательных организаций в Интернете, поддержка инициативы открытого доступа для значительного увеличения передачи научных и культурных знаний, полученных университетами, всему обществу. Публикация рейтингов является одним из самых мощных и эффективных инструментов для запуска и консолидации процессов изменения в научных кругах, увеличения приверженности ученых и создания необходимых долгосрочных стратегий [1].

Во многих государствах разрабатываются специальные проекты, которые обеспечивают всестороннюю поддержку научной деятельности университетов. В России в 2013 г. был утвержден проект государственной программы поддержки крупнейших российских вузов, запущенной Министерством образования и науки России, «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки» [2]. Целью текущего проекта является повышение конкурентоспособности российских вузов, а также высшего образования в России и вывод пяти российских вузов в 100 лучших мировых университетов по версии авторитетных рейтинговых систем [3], [4]. Итогом проекта должно стать выявление в России к 2020 г. группы современных университетов-лидеров с эффективной структурой управления и международной академической репутацией, способных соответствовать мировым тенденциям развития и мобильно реагировать на глобальные изменения [5], [6]. На сегодняшний день только один российский университет — Московский государственный университет (далее — МГУ) — попадает в число первых 500 вузов (занимает

в рейтинге 138 место). Возможной причиной этого является то, что университеты на своих сайтах размещают мало информации о научной деятельности, а также не дублируют данную информацию на английском языке [7].

### Постановка задачи

Задача: исследовать систему Webometrics, рассмотреть методы и критерии оценки, а также способ ранжирования, проанализировать основные показатели, влияющие на позицию университета в рейтинге, сформулировать практические рекомендации по повышению позиций университета на примере ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова».

### Cybermetrics Lab

«Webometrics Ranking of World Universities» — это инициатива Cybermetrics Lab, исследовательской группы, принадлежащей к Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) — крупнейшей государственной научной организации Испании. CSIC сотрудничает с учреждениями, которые занимаются исследованиями и проводят НИОКР (университеты, автономные организации, другие государственные и частные научно-исследовательские организации), и с социальными, экономическими, национальными или иностранными агентами, которые обеспечивают научно-исследовательский потенциал, а также людские и материальные ресурсы для развития научно-исследовательских проектов или для научно-технической поддержки. CSIC образована с целью количественного анализа интернет-содержимого, которое непосредственно связано с процессами создания научного знания. Показатели Cybermetrics Lab полезны для оценки науки и технологии, они отлично дополняют результаты, полученные с помощью библиометрических методов в наукометрических исследованиях. Конкретные направления исследований включают в себя:

- разработку web-индикаторов, применяемых в испанских, европейских, латиноамериканских и других мировых научно-исследовательских организациях, которые занимаются НИОКР;
- количественные исследования о научной коммуникации с помощью электронных журналов и архивов, а также влияние инициатив по открытому доступу;
- значение показателей и визуализацию в социальных сетях качественным, динамичным и интерактивным графическим интерфейсом;
- исследования, которые направлены на web-развитие прикладных методов Cybermetrics Lab на основе позиции в поисковом запросе;
- анализ использования информации с помощью интеллектуального анализа web-данных из файлов журналов [1].

### Web-индикаторы для оценки научной активности

Разработчики Webometrics утверждают, что web-индикаторы, по которым проводится анализ активности научной деятельности университета, позволяют выявить, насколько профессорско-преподавательский состав, студенты и аспиранты вовлечены в исследовательскую деятельность. В первую очередь, это касается цитирования научных публикаций размещенных в наиболее авторитетных научных журналах, включенных в международные реферативные базы данных например, Scopus или Web of Science. По методике Cybermetrics Lab строится алгоритм ранжирования сайтов на основе четырех индикаторов: Visibility (Impact), Size (Presence), Rich files (Openness), Scholar (Excellence). Алгоритм заключается в том, что происходит подсчет индикаторов по следующей формуле:

$$WR = 4 \cdot RankV + 2 \cdot RankS + 1 \cdot RankR + 1 \cdot RankSc, \quad (1)$$

где  $RankV$  — Visibility (Impact) / Видимость сайта;  $RankS$  — Size (Presence) / Количество проиндексированных страниц;  $RankR$  — Rich files (Openness) / Открытость или доступность;  $RankSc$  — Scholar (Excellence) / Цитирование научных публикаций [8].

Рассмотрим подробно индикаторы, по которым оценивается и выстраивается рейтинг Webometrics.

1. Visibility (Impact) / Видимость сайта, т. е. количество уникальных внешних ссылок и доменов, которые ссылаются на ресурс. В системе не указано, какие именно поисковые методики используются, и затруднительно проверить число доменов, ссылающихся на ресурс. Однако возможна проверка числа внешних ссылок через поисковую систему Google путем набора в поисковой строке link: site.ru. При анализе домены высокорейтинговых научных сайтов, которые ссылаются на ресурс, дают больший вес, чем обычные ссылки с новостных порталов.

2. Size (Presence) / Количество проиндексированных страниц. Этот критерий выявляет количество проиндексированных страниц портала университета в поисковой системе Google, размещенных на главном домене вуза и найденных поисковыми системами. Данный критерий можно также проверить через поисковую систему Google, указывая в поисковой строке site:site.ru.

3. Rich files (Openness) / Открытость. Данный критерий учитывает количество pdf-файлов, размещенных на сайте университета, которые были найдены в поисковой системе Google.

4. Scholar (Excellence) / Цитирование научных публикаций. Этот критерий учитывает 10 % наиболее цитируемых научных публикаций университета по различным дисциплинам. Научно-исследовательская группа Scimago проводит оценку научной деятельности университета по количеству как русскоязычных, так и англоязычных публикаций [6], [9].

Изучив данные индикаторы, можно заметить, что Webometrics уделяет много внимания научной деятельности университета и контента сайта раздела научной деятельности.

### Оценка позиций некоторых российских вузов в рейтинге Webometrics

Рассмотрим позиции университетов, подведомственных Росморречфлоту в мировом рейтинге (табл. 1).

Таблица 1

Рейтинг университетов, подведомственных Росморречфлоту [1]

| Позиция | Университет                                                                                                                      | Показатель Presence | Показатель Impact | Показатель Openness | Показатель Excellence |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 6240    | Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского (далее — МГУ имени адмирала Г. И. Невельского)              | 6126                | 6291              | 4346                | 5484                  |
| 6478    | Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (далее — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) | 2716                | 7956              | 3570                | 5484                  |
| 13161   | Волжский государственный университет водного транспорта                                                                          | 12066               | 14266             | 8165                | 5484                  |
| 13224   | Сибирский государственный университет водного транспорта                                                                         | 15956               | 13041             | 10484               | 5484                  |
| 14470   | Московская государственная академия водного транспорта                                                                           | 16242               | 14572             | 11759               | 5484                  |
| 15768   | Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова                                                                 | 14120               | 13750             | 20723               | 5484                  |

2716 — лучший показатель по web-индикатору;

16242 — худший показатель по web-индикатору.

Самый лучший показатель по web-индикатору Presence у ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, это говорит о том, что количество страниц сайта ГУМРФ намного больше, чем у остальных вузов. По web-индикатору Impact — у МГУ имени адмирала Г. И. Невельского, из чего следует, что на сайт университета ссылаются больше страниц и доменов различных сайтов, чем на другие вузы в представленной таблице. По web-индикатору Openness лидирующую позицию также занимает ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, что говорит об открытости сайта и большем количестве pdf.-файлов, размещенных на сайте. По web-индикатору Excellence все показатели одинаковы, это значит, что количество цитируемых материалов университетов примерно одинаково. Как видно из табл. 1, два университета — МГУ имени адмирала Г. И. Невельского и ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова — занимают лидирующие позиции в рейтинге университетов, подведомственных Росморречфлоту.

Стоит отметить, что по данным Scopus и Web of Science у этих вузов относительно высокие показатели по числу публикаций и количеству зарегистрированных авторов. Эти важные показатели удовлетворяет сразу двум индикаторам: Rich files (Openness) и Scholar (Excellence) [10]. Однако, эти два вуза также не входят даже в 5000 лучших мировых вузов по версии Webometrics. Возможно, текущие низкие позиции в рейтинге говорят о том, что университеты уделяют больше внимания информации, которая касается непосредственно сферы водного транспорта и обучению специалистов, а не проводимым научным мероприятиям в университете [11].

Помимо рейтинга Webometrics был рассмотрен QS World University Ranking — один из наиболее значимых рейтингов лучших университетов мира. QS World University Rankings — глобальное исследование и сопровождающий его рейтинг лучших университетов мирового значения по версии британской консалтинговой компании Quacquarelli Symonds (QS) [12]. Эти рейтинговые системы имеют общие подходы в рейтинговании вузов. Уровень достижений университетов в QS World University Rankings оценивается на основании результатов комбинации статистического анализа деятельности учебных заведений, аудированных данных (включая информацию по индексу цитирования из базы данных Scopus, а также данных глобального экспертного опроса представителей международного академического сообщества и работодателей, которые высказывают свои мнения об университетах.

Для сравнения были рассмотрены позиции и показатели университетов стран БРИКС в рейтинге Webometrics и QS World University Ranking (табл. 2).

Таблица 2

**Позиции университетов стран БРИКС  
по версии QS World University Ranking (далее — QS) и в Webometrics**

| Университет                                                             | Позиция в рейтинге стран БРИКС | Позиция в рейтинге Webometrics | Количество публикаций в Scopus (2015 г.) |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| Белгородский государственный национальный исследовательский университет | 151 – 200                      | 1781                           | 102                                      |
| Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова           | 151 – 200                      | 2276                           | 61                                       |
| Петрозаводский государственный университет                              | 151 – 200                      | 3332                           | 101                                      |
| Российский государственный гуманитарный университет                     | 151 – 200                      | 3529                           | 142                                      |
| Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва              | 151 – 200                      | 3682                           | 71                                       |
| Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта                | 151 – 200                      | 4533                           | 126                                      |

Таблица 2  
(Окончание)

|                                                                           |           |      |    |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|------|----|
| Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова | 151 – 200 | 5758 | 58 |
| МГУ имени адмирала Г. И. Невельского                                      | –         | 6240 | 9  |
| Калининградский государственный технический университет                   | 151 – 200 | 6247 | 30 |
| ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова                                       | –         | 6478 | 19 |

Как видно из таблицы, количество публикаций индексируемых Scopus влияет на позицию в международном рейтинге [13]. Однако это не единственный показатель, по которому возможно улучшить позицию в рейтинге. Далее приведены показатели, по которым проводится оценка и анализ университета, для определения его позиции по версии QS World University Ranking:

- индекс академической репутации: проводится опрос среди преподавателей-участников академического сообщества QS Global Academic Survey;
- индекс репутации среди работодателей: проводится опрос среди работодателей-участников сообщества QS Global Employer Survey;
- соотношение численности профессорско-преподавательского состава и обучающихся;
- индекс цитирования научных статей преподавательского состава по отношению к численности преподавательского состава (база данных Scopus);
- количество преподавателей и сотрудников со званием доктора наук;
- доля иностранных преподавателей в общей численности преподавательского состава (по эквиваленту полной ставки);
- доля иностранных студентов в общей численности обучающихся (программы полного цикла обучения);
- индекс цитирования научных статей образовательной организации другими образовательными организациями или исследовательскими центрами.

В результате анализа перечисленных показателей был сделан вывод, что многие из них опираются на «научность» университета, также как и Webometrics. Поэтому необходимо в комплексе проводить мероприятия, которые позволят университету подняться в рейтинге.

### **Практические рекомендации по повышению позиций в Webometrics и QS World University Rankings для ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова**

Чтобы повысить позицию в рейтинге Webometrics необходимо сделать следующее.

#### **1. Обеспечить правильные внутреннюю и внешнюю перелинковки:**

- внутренняя перелинковка предполагает оптимальное распределение веса сайта — рассредоточить информацию в нужных пропорциях и на нужных страницах. Очень важно учитывать, что ссылающиеся друг на друга страницы должны быть схожей тематики или продолжением одного и того же вопроса;
- внешняя перелинковка предполагает, что сайт с большим весом ссылается на сайт с меньшим, тем самым добавляя вес последнему, не причиняя ущерб своим показателям. Следует заметить, что сайты, ссылающиеся друг на друга, не являются эффективными и не добавляют вес. Также стоит обращать внимание на анкоры (часть ссылки, находящаяся между открывающим тегом «а» и закрывающим тегом «/а»), которые поисковый робот принимает во внимание.

#### **2. Правильно наполнить контентом страницы сайта о научной деятельности:**

– следует полно отобразить всю имеющуюся информацию о научной деятельности университета, учитывая при этом как основные мероприятия, так и второстепенные;

– продолжать хранить в открытом доступе материалы конференций, семинаров, научных собраний, а также результатов научной деятельности: публикаций, научных работ, учебно-методических рекомендаций, которые должны сопровождаться аннотацией как на русском, так и на английском языках;

– продолжать хранить в открытом доступе научные журналы и издания университета;

– в обязательном порядке дублировать разделы с информацией о научной деятельности университета на английском языке;

– публиковать новости о предстоящих или прошедших научных конференциях, семинарах и проч. как на английском, так и на русском языках.

3. Стимулировать студентов, аспирантов и профессорско-преподавательский состав к публикации своих работ в изданиях, индексируемых международными базами данных научных публикаций, например: Google Scholar, Scopus, Web of Science и других.

4. Активно размещать материалы и новости о предстоящих и проведенных конференциях, публикациях, результатах научной деятельности и т. д. в социальных сетях. Причем использовать не только российские социальные сети, но и зарубежные.

С учетом того, что ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова имеет возможность в скором времени войти в рейтинг лучших университетов стран БРИКС, необходимо провести дополнительные мероприятия для достижения этой цели:

– стимулировать профессорско-преподавательский состав (далее — ППС) и сотрудников университета на получение звания доктора наук;

– проводить международные программы по обмену опытом как среди обучающихся, так и среди ППС;

– привлекать иностранных студентов и преподавателей для обучения и преподавания соответственно в университете.

С учетом этих рекомендаций станет возможным повышение позиции в рейтинге стран БРИКС, а, следовательно, и в рейтинге Webometrics, так как все международные рейтинги связаны между собой.

### **Оценка результатов проведенных исследований**

В процессе исследования рейтинга Webometrics были выявлены основные методы оценки научной деятельности вузов, по результатам которых составляется рейтинг мировых университетов. Можно сказать, что данные критерии оценки на сегодняшний день носят неопределенный характер, т. е. невозможно в полной мере оценить научную активность того или иного университета, ссылаясь на результаты полученных показателей. Многие университеты активно занимаются научной деятельностью, однако не уделяют должного внимания публикации каждого результата в сети Интернет. Это приводит к тому, что программа, анализируя университет, не находит запрошенной информации и пропускает оценку по данному показателю.

Кроме того, сравнивать вузы по их информационной активности в Интернете целесообразно по отдельным группам, объединяющим однородные вузы: так, например, большой научно-исследовательский университет сравнивать с физкультурными учебными заведениями, вузами культуры и искусства бессмысленно, так как требование производить научную продукцию к ним не слишком применимо. В 2002 г. проводилась оценка индекса цитируемости российских академиков Б. Штерном, который пришел к выводам, что наиболее высокий индекс цитируемости у математиков. Затем идут другие естественные науки: физика, биология, химия, геология. А гуманитарные науки сильно отстают; никто из представителей этих наук не достиг 1000 цитирований [14].

Релевантность способа оценки научных работ, основанного на их цитируемости можно подвергнуть сомнению в связи с его уязвимостью. Ежегодно из всемирных индексов научного

цитирования, таких как Web of Science, Scopus и др. исключаются журналы, замеченные в искусственном завышении рейтингов путём необоснованного цитирования. При этом ряд влиятельных изданий вместе с учеными начали борьбу за отказ от использования импакт-фактора как такового [15], [16].

Конечно, объективность индикаторов, по которым оценивается и выстраивается рейтинг Webometrics, можно подвергать сомнению. Однако на сегодняшний день не существует более эффективного способа оценки активности научной деятельности университетов, степени вовлечения в исследовательскую деятельность профессорско-преподавательского состава, студентов и аспирантов [17].

### Заключение

Стоит отметить, что высокий рейтинг Webometrics улучшает позиции университета среди других, повышая его репутацию. Он не только заостряет свое внимание на активной научной деятельности, но и показывает масштабы развития научных школ, научно-исследовательских институтов и университетов.

При более высокой позиции в рейтинге Webometrics университет может открыть для себя множество возможностей. Во-первых, это привлечение студентов — как иностранных, так и российских, — а также преподавателей и научных сотрудников. И, во-вторых, это позволяет привлекать инвестиции для развития науки в университете [15].

Повышая позицию в мировом рейтинге, университет обеспечивает себе достаточно прочную репутацию в международных отношениях. Он позиционирует себя как успешный, постоянно развивающийся, перспективный вуз, что дает возможность получить как государственную, так и частную поддержку [18].

В заключение можно сказать, что возможности и перспективы, открывающиеся перед университетами, которые занимают лидирующие позиции в рейтинговой системе Webometrics, а также условия повышения позиции в этом рейтинге, являются эффективным стимулом для роста научной и публикационной активности для российских вузов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WEBOMETRICS / Ranking Web of Universities [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: <http://www.webometrics.info/en> (дата обращения: 09.04.2016).
2. Проект повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров «5–100» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://5top100.ru/> (дата обращения: 12.04.2016).
3. Ъ-Новости «15 российских вузов получают господдержку для вхождения в мировые рейтинги». Электронная газета «Коммерсантъ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kommersant.ru/doc/2229575/> (дата обращения: 15.04.2016).
4. Ъ-Новости «Программа господдержки ведущих российских вузов продлена до 2020 года». Электронная газета «Коммерсантъ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kommersant.ru/doc/2849490/> (дата обращения: 15.04.2016).
5. Постановление Правительства РФ от 29.10.2012 г. № 2006-р «Об утверждении плана мероприятий по развитию ведущих университетов, предусматривающих повышение их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://минобрнауки.рф/документы/2945/> (дата обращения: 12.04.2016).
6. Постановление Правительства РФ от 16 марта 2013 г. № 211 «О мерах государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://минобрнауки.рф/документы/3208/> (дата обращения: 10.04.2016).
7. РИА-Новости. «Ведущие вузы РФ в 2016-2017 годах получают до 14,5 миллиарда рублей» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ria.ru/society/20151107/1315464009.html/> (дата обращения: 15.04.2016).

8. Mike Thelwall. Webometrics and Social Web Research Methods [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.scit.wlv.ac.uk/~cm1993/papers/IntroductionToWebometricsAndSocialWebAnalysis.pdf> (дата обращения: 10.04.2016).
9. Mukherjee B. Qualitative, quantitative and webometric analysis / B. Mukherjee // Scholarly Communication in Library and Information Services. — 2010. — Pp. 91—104. DOI:10.1016/B978-1-84334-626-5.50003-3
10. WEBOMETRICS: рейтинг лучших высших учебных заведений мира [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.education-medelle.com/articles/webometrics--rejting-luchschikh-visschikh-uchebnikh-zavedenij-mira.html/> (дата обращения: 08.04.2016).
11. Соколов С. С. Электронная информационно-образовательная среда современно университетского комплекса / С. С. Соколов, Н. М. Ковальногова // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практич. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 1. — С. 157–163.
12. QS World University Ranking / Top university Worldwide university rankings, guides and events [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.topuniversities.com/qs-world-university-rankings> (дата обращения: 17.04.2016).
13. The top 200 universities in BRICS 2015 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iu.qs.com/university-rankings/qs-classifications/> (дата обращения — 17.04.2016).
14. Пастушак Т. Н. Приоритетные направления развития электронной информационно-образовательной среды отраслевого университетского комплекса / Т. Н. Пастушак, С. С. Соколов, Н. М. Ковальногова, А. В. Маньковская // Информационные технологии. — 2014. — № 9. — С. 40–46.
15. Vaughan L. Word co-occurrences on Webpages as a measure of the relatedness of organizations: A new Webometrics concept / L. Vaughan, J. You // Journal of Informetrics. — 2010. — Vol. 4. — Is. 4. — Pp. 483–491. DOI:10.1016/j.joi.2010.04.005.
16. Thelwall M. Introduction to Webometrics: Quantitative Web Research for the Social Sciences» / M. Thelwall // Synthesis Lectures on Information Concepts, Retrieval, and Services. — 2009. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 1–116.
17. Kousha K. Using the Web for research evaluation: The Integrated Online Impact indicator / K. Kousha, M. Thelwall, S. Rezaie // Journal of Informetrics. — 2010. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 124–135. DOI:10.1016/j.joi.2009.10.003.
18. Pavel A. P. Global University Rankings — A Comparative Analysis / A. P. Pavel // Procedia Economics and Finance. — 2015. — Vol. 26. — Pp. 54–63. DOI:10.1016/S2212-5671(15)00838-2.

## RESEARCH OF WEBOMETRICS RANKING OF WORLD UNIVERSITIES AS A WAY TO PROMOTE UNIVERSITY'S SCIENTIFIC ACTIVITY AND WEB-PRESENCE

*In this article the rank system Webometrics or Webometrics Ranking of World Universities was considered. Webometrics is the ranking of world universities. In the research process was discussed methods and evaluation criteria, and the ranking methods. Four main web-indicators were picked out, which used for ranking methods. Problems of Russian universities low position in Webometrics rank were determined and ways to improve this position were suggested. General conclusion on the issues discussed and proposed actions of increase in the Webometrics ranking position system has been composed. The rank system QS World University Rankings by Britain consulting company Quacquarelli Symonds (QS) was considered. The scientific novelty of this work is to form practical recommendations for improving university positions in the ranking of the example of Admiral Makarov State University of Marytime and Inland Shipping.*

*Keywords: Webometrics Ranking of World Universities, QS World University Rankings rank systems, university's scientific activity, rank of world universities, Russian educational institutions, Project 5-100, result of scientific activity.*

## REFERENCES

1. WEBOMETRICS/ Ranking Web of Universities. Web. 9 Apr. 2016 <<http://www.webometrics.info/en/>>.
2. Proekt povyshenija konkurentosposobnosti vedushhih rossijskih universitetov sredi vedushhih mirovyh nauchno-obrazovatel'nyh centrov «5-100». Web. 12 Apr. 2016 <<http://5top100.ru/>>.
3. Ъ- Novosti «15 rossijskih vuzov poluchat gospodderzhku dlja vhozhdenija v mirovye rejtingi. Web. 15 Apr. 2016 <<http://www.kommersant.ru/doc/2229575/>>.

4. Ъ- Novosti «Programma gospodderzhki vedushhih rossijskih vuzov prodlena do 2020 goda». Web. 15 Apr. 2016 <<http://www.kommersant.ru/doc/2849490/>>.
5. Postanovlenie № 2006-р «Ob utverzhdenii plana meroprijatij po razvitiyu vedushhih universitetov, predusmatrivajushhih povyshenie ih konkurentosposobnosti sredi vedushhih mirovyh nauchno-obrazovatel'nyh centrov». Web. 12 Apr. 2016 <[минобрнауки.рф/документы/2945/](http://минобрнауки.рф/документы/2945/)>.
6. Postanovlenie Pravitel'stva Rossii ot 16 marta 2013 g. №211 «O merah gosudarstvennoj podderzhki vedushhih universitetov Rossijskoj Federacii v celjah povyshenija ih konkurentosposobnosti sredi vedushhih mirovyh nauchno-obrazovatel'nyh centrov». Web. 10 Apr. 2016 <[минобрнауки.рф/документы/3208/](http://минобрнауки.рф/документы/3208/)>.
7. RIA-Novosti «Vedushhie vuzy RF v 2016-2017 godah poluchat do 14,5 milliarda rublej». Web. 15 Apr. 2016 <<http://ria.ru/society/20151107/1315464009.html/>>.
8. Mike Thelwall. Webometrics and Social Web Research Methods. University of Wolverhampton. Web. 10 Apr. 2016 <<http://www.scit.wlv.ac.uk/~cm1993/papers/IntroductionToWebometricsAndSocialWebAnalysis.pdf>>.
9. Mukherjee, Bhaskar. "Qualitative, quantitative and webometric analysis." Scholarly Communication in Library and Information Services (2010): 91–104. DOI:10.1016/B978-1-84334-626-5.50003-3
10. WEBOMETRICS: rejting luchshih vysshih uchebnyh zavedenij mira. Web. 8 Apr. 2016 <<http://www.education-medelle.com/articles/webometrics--rejting-luchschikh-visschikh-uchebnikh-zavedenij-mira.html/>>.
11. Sokolov, S. S., and N. M. Kovalnogova. "Electronic informational and educational environment of modern university complex." Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. Vol. 1. 157–163.
12. QS World University Ranking / Top university Worldwide university rankings, guides and events. Web. 17 Apr. 2016 <<http://www.topuniversities.com/qs-world-university-rankings>>.
13. The top 200 universities in BRICS 2015. Web. 17 Apr. 2016 <<http://www.iu.qs.com/university-rankings/qs-classifications/>>.
14. Pastyschak, T. N., S. S. Sokolov, N. M. Kovalnogova, and A. V. Mankovskaya. "Priority Areas for the Development of Electronic Informational and Educational Environment of the University Complex." Information technologies 9 (2014): 40–46.
15. Vaughan, Liwen, and Justin You. "Word co-occurrences on Webpages as a measure of the relatedness of organizations: A new Webometrics concept." Journal of Informetrics 4.4 (2010): 483–491. DOI:10.1016/j.joi.2010.04.005.
16. Thelwall, Michael. "Introduction to Webometrics: Quantitative Web Research for the Social Sciences." Synthesis Lectures on Information Concepts, Retrieval, and Services 1.1 (2009): 1–116.
17. Kousha, Kayvan, Mike Thelwall, and Somayeh Rezaie. "Using the web for research evaluation: the integrated online impact indicator." Journal of Informetrics 4.1 (2010): 124–135. DOI:10.1016/j.joi.2009.10.003
18. Pavel, Adina-Petruta. "Global University Rankings-A Comparative Analysis." Procedia Economics and Finance 26 (2015): 54–63. DOI:10.1016/S2212-5671(15)00838-2.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Смышляева Екатерина Олеговна* — специалист по программным и техническим средствам обучения.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*Esmysh@yahoo.com*  
*Ковальногова Надежда Михайловна* — аспирант.  
Научный руководитель:  
*Соколов Сергей Сергеевич*.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*KovalnogovaNM@gumrf.ru*  
*Соколов Сергей Сергеевич* — кандидат технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*Sokolovss@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Smyshliaeva Ekaterina Olegovna* — Specialist software and hardware training.  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
*Esmysh@yahoo.com*  
*Kovalnogova Nadezhda Mihajlovna* — Postgraduate.  
Supervisor:  
*Sokolov Sergej Sergeevich*.  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
*KovalnogovaNM@gumrf.ru*  
*Sokolov Sergej Sergeevich* — PhD, associate professor.  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
*Sokolovss@gumrf.ru*

Научное периодическое издание

# **Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Выпуск 3 (37)**

**2016 год**

Выпускающие редакторы  
*Н. А. Карамзина, Т. В. Середова*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*  
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 24.04.16. Формат 60х90/8  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 30,25. Тираж 500 экз. Заказ № 327/16

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7