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

ВЕСТНИК

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

Том 10. № 2

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 2. — 210 с.

ISSN (print) 2309-5180
ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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

ISSN 2309-5180
9 772309 518784 >

© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Том 10. № 2

2018

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 259

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах.....259

Майоров Н. Н. Задача синтеза структуры морского пассажирского терминала 275

Решняк В. И. Опыт организации и использования технических средств для ликвидации аварийных разливов нефти 287

Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017 – 2018 гг. 300

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 309

Кузьмицкий М. Л., Ксенофонтов Н. М., Чистов В. Б. Исследование упругих прогибов подъемно-опускных ворот под гидростатическим напором с учетом воздействия деструктивных процессов старения 309

Ивановский Ю. К., Моргунов К. П., Рябов Г. Г. Лабораторные исследования автодорожного водопропускного сооружения 318

Дорошенко Н. И., Белов Д. М., Крийт В. Е. Качество вод береговой зоны Финского залива в 2016 – 2017 гг. 331

Смирнов-Туманов Я. С., Панченко Н. М. Результаты исследования фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси 338

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 346

Веселков В. В., Рыдловский В. П., Штайц В. В. Совершенствование технологии испытаний на герметичность защитных оболочек атомных судов новых проектов 346

До Т. М., Сахно К. Н. Разработка теоретической основы исследования компенсационных возможностей отклонений в судовых системах трубопроводов 356

Богданова Н. В., Кузьмин А. А., Шнуренко А. А. Перспективы использо вания газового оксикарбонитрирования при восстановлении деталей судовых технических средств 363

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 379

Безюков О. К., Жуков В. А., Пуляев А. А. Выбор параметров охлаждения судовых дизелей 379

Леонов В. Е., Тимошенко В. В. Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности судна 390

Саламех А. Исследование изгибной выносливости зубьев колес судовых редукторов, подвергаемых поверхностной закалке токами высокой частоты 402

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор
С. О. Барышников,
д.т.н., проф.
rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора
А. П. Ныркov,
д.т.н., проф.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

Ф. В. Кармазинов —
координатор стратегических программ ГУП «Водоканал СПб», д.т.н., проф.

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

А. И. Пошивай —
заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —
д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.
Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.
Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.
Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

Члены редколлегии:

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....411

Виноградов А. А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора.....411

Белоусов И. В., Самосейко В. Ф., Бровцинова Л. М. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции 420

Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации 430

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ.....444

Печников Д. А. Применение методов инструментального наблюдения и тестирования в реализации текущего педагогического контроля в информационных системах оценки при подготовке специалистов морского флота.....444

Ивакин Я. А., Потапычев С. В. Информационная технология геохронологического трекинга для проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта 452

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 259

Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. Simulation in the tasks of sea port operational analyses 259

Maiorov N.N. The task of synthesis of the structure of the maritime passenger terminal 275

Reshnyak V.I. The experience of the organization and use of technical means for liquidation of emergency oil spill 287

Ol'khovik E.O. Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18 300

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 309

Kuzmitskiy M.L., Ksenofontov N.M., Chistov V.B. Investigation of elastic deflections of lifting-gate under a head with account hydrostatic of influence of destructive processes of deterioration 309

Ivanovskiy Yu.K., Morgunov K.P., Ryabov G.G. Laboratory investigations of road water freight construction 318

Doroshenko N.I., Belov D.M., Kriyt V.E. Water quality coastal zone of the Gulf of Finland in 2016-2017 331

Smirnov-Tumanov Ja.S., Panchenko N.M. Results of research of physical-mechanical properties of the combined sand-gravel mixture 338

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 346

Veselkov V.V., Rydlovsky V.P., Shtayts V.V. Advancement of leakages testing technology for testing reactor containments of new atomic vessels 346

Do T.M., Sakhno K.N. Development of theoretical base for research into compensation opportunities of deviations in the ship piping systems 356

Bogdanova N.V., Kuz'min A.A., Shnurenko A.A. Prospects of using gas oxycarbonitriding at restoration of components of ship technical means 363

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 379

Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Pulyaev A.A. The choice of cooling parameters for marine diesel engines 379

Leonov V.Ye., Timoshenko V.V. Investigation of the impact of marine transition parameters on the operational coefficient of energy efficiency of the ship 390

Salameh A. Research of bending endurance of gear wheels in marine gearboxes subjected to surface hardening by high-frequency currents 402

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 411

Vinogradov A.A. Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator 411

Volume 10. № 2

2018

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

F. V. Karmazinov —
Strategic Program Coordinator of SUE "Vodokanal of St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

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

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

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

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

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

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

Belousov I.V., Samosejko V.F., Brovtsinova L.M. Comparative analysis of the pulse width modulation methods 420

Tyrva V.O. Joint control by object in ergatic system: models and realizations 430

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 444

Pechnikov D.A. Application of methods of instrumental observation and testing in the implementation of current pedagogical control in information systems of estimation at the training of specialists of the marine fleet 444

Ivakin Y.A., Potapichev S.N. Information technology of geochronological tracking for hypotheses testing in research of ship use 452

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274

SIMULATION IN THE TASKS OF SEA PORT OPERATIONAL ANALYSES

A.L. Kuznetsov[1], A.V. Kirichenko[1], V.N. Shcherbakova-Slyusarenko[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

The current stage of the development of the technology for the design of complex production objects, which the sea ports and terminals undoubtfully included in this category, assumes the intensive use of the computerization and modern discrete mathematics as the part of artificial intelligence. Many specialists regard the design and project as a procedure as the guided data transformation. The size and complexity of data sets exclude the possibility of manual implementation of this procedure and data contingency maintaining. The parallel development of the simulation theory, software platforms for the relevant implementation and practice of the products' utilization in design caused serious gaps in terminology and interpretation of key concepts. Starting as a minor methodological inconvenience, this divergence gradually has developed into a serious obstacle for the practical implementation, since the users, the designers and model developers ceased to understand each other. Ever and ever advanced and sophisticated software tools for the simulation, increasing interest of the specialists in the computer sciences create new possibilities that do not correspond to the level of practical utilization of the simulation models. Besides the difficulties with the outlaying of the copes and expected results of the simulation, the problem is in the absence of the universal and generally acknowledged means for the adequacy proving. The simulation models could serve as very powerful and efficient tool for the investigation of the object's properties, but only under condition that they properly reflect the real object and not its analogue, close or distant. The paper displays the separate phases of the model's development over a specially selected example. Different methodological paradigms are combined into a toolkit that provides a designated succession of models inheriting their main features. Every stage has its own goals, tasks and limitations that are identified by the study, as well as the regular procedure of adequacy proof is discussed.

Keywords: port operations, simulation models, model adequacy.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

УДК 656.615

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ОПЕРАЦИЙ В МОРСКИХ ПОРТАХ

А. Л. Кузнецов[1], А. В. Кириченко[1], В. Н. Щербакова-Слюсаренко[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

Нынешний этап развития технологии проектирования сложных производственных объектов, к которым в полной мере относятся морские и сухопутные грузовые терминалы, невозможен без использования современной вычислительной техники и дискретной математики. Проектирование многими специалистами рассматривается как процедура направленного преобразования данных, рост объема которых и требование поддержания их непротиворечивости без информационных технологий делает реализацию данной проблемы нереальной. Параллельное развитие теории моделирования, программной среды его

реализации и практики использования его в проектировании привели к значительным несоответствиям в терминологии и интерпретации основных используемых понятий. Из сугубо методической проблемы это расхождение постепенно стало превращаться в серьезное препятствие для практического внедрения, поскольку заказчики, проектировщики и создатели моделей перестали понимать друг друга. Все более развитые программные средства создания моделей и усиливающийся интерес специалистов в области создания программного продукта создают возможности, которые в значительной мере не соответствуют уровню практического использования моделей. Кроме затруднений с определением границ возможности и перечня ожидаемых от моделирования результатов, проблему создает отсутствие единообразных средств установления адекватности моделей. Модели являются мощным и эффективным способом изучения свойств проектируемого или исследуемого объекта, но лишь при условии, что они действительно отражают именно его свойства, а не какого-либо аналога, близкого или далекого от реальности. В статье на специально выбранном примере операции рассматриваются отдельные фазы создания имитационной модели, основанные на использовании различных парадигм общей теории. Устанавливаются цели и ограничения каждого из этапов, а также соответствующих им методов, описывается процедура формального установления адекватности создаваемой серии моделей.

Ключевые слова: портовые операции, имитационное моделирование, адекватность.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

Введение (Introduction)

В настоящее время математическое моделирование является неотъемлемой частью большинства проектов, связанных с проектированием, созданием и эксплуатацией технических объектов. В сфере портовых технологий это отмечается в работах [1] – [4]. Бурное развитие вычислительной техники, дискретной математики и методологии программирования привело к появлению бесчисленного количества методов и программных средств, формы и суть которых создают значительные трудности даже для их классификации. Наиболее известные платформы для моделирования портовых операций описаны в публикациях [5], [6].

Указанная проблема обнаруживается как в целом, так и в отдельных частях, например, в имитационном моделировании, которое является наиболее интенсивно развивающейся и глубоко исследуемой дисциплиной, предлагает много различных определений и оснований классификации, во многом противоречивых и спорных. Все это приводит к тому, что сформировавшиеся у различных специалистов и в разных школах представления переносятся на смежные области без необходимой корректировки и изменения интерпретации, в лучшем случае внося путаницу в терминологию и методологию создания прикладных моделей, в худшем случае модели утрачивают адекватность, понимаемую как совпадение свойств (функций / параметров / характеристик и т. п.) модели и соответствующих свойств моделируемого объекта. Сохранение или утрату адекватности необходимо доказывать, поскольку не имеющая этого свойства модель не представляет никакой ценности, гносеологической или практической, что указывалось в работах [7] и [8].

В данном исследовании не ставится задача наведения порядка в классификации методов имитационного моделирования, эта проблема находится далеко за пределами практической сферы, приближаясь, в некотором смысле, к теоремам Гёделя о неполноте. Наличие разнообразных и зачастую противоречивых толкований одних и тех же терминов подтверждает анализ работ [9] – [11]. Проблема согласования различных интерпретаций в современной международной логистике и портовых операциях рассмотрена в работе [12], где ставится и решается задача практической классификации систем имитационного моделирования, используемых для анализа операций различной природы, в основном связанных с транспортно-логистической сферой. Построенная классификация предлагает одновременно и способ доказательства адекватности моделей, создаваемых в предлагаемой парадигме. Все рассуждения иллюстрируются примерами, для нагляд-

ности которых они касаются одной операции. Реальное моделирование на всех стадиях процесса выполняется для полной совокупности операций, составляющих функциональное назначений моделируемого объекта, но описание конкретных реализаций подобных проектов выходит за рамки этой работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть некоторое оборудование имеет часовую производительность операций $p_ч$, а расчетный годовой объем операций составляет величину $Q_{год}$. Необходимо получить ответы на следующие вопросы: *сколько единиц оборудования потребуется для выполнения этого задания? Какой метод следует использовать для ответа на этот вопрос?*

В первом приближении ответ может быть найден следующим образом: год насчитывает 365 сут и среднесуточный объем требуемых операций составит $Q_{сут} = \frac{Q_{год}}{365}$. В сутках имеется 24 ч, и среднечасовой объем операций составит $Q_ч = \frac{Q_{сут}}{24}$. Отсюда искомое значение требуемого количества оборудования составит величину $N = \frac{Q_ч}{p_ч}$.

В то же время расчетный годовой грузопоток может складываться из отдельных суточных значений, колеблющихся вокруг некоторого среднесуточного значения (рис. 1).

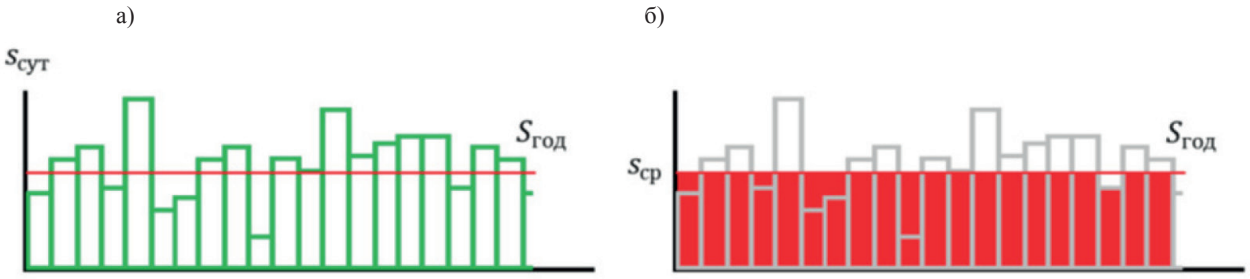


Рис. 1. Среднесуточные значения как случайная (*а*) и детерминированная (*б*) величина

В проведенных расчетах случайная величина заменена ее средним значением, поскольку математический аппарат работы с формулами, использующими в качестве переменных случайные величины, отсутствует. То же самое относится и к часовой производительности в каждые сутки: это будет случайная величина, колеблющаяся вокруг среднечасового значения, которое, как было установлено ранее, само является случайной величиной (рис. 2). Отсюда следует, что требуемое количество оборудования в каждый отдельно взятый час также является случайной величиной, которая будет определяться суперпозицией распределений суточных и часовых потребностей в выполнении операций. Кроме того, случайной величиной может оказаться и часовая производительность единицы оборудования $p_ч$. В то же время требуемое количество оборудования в большинстве случаев является детерминированной величиной, значение которой должно быть выбрано исходя из свойств соответствующей случайной величины.

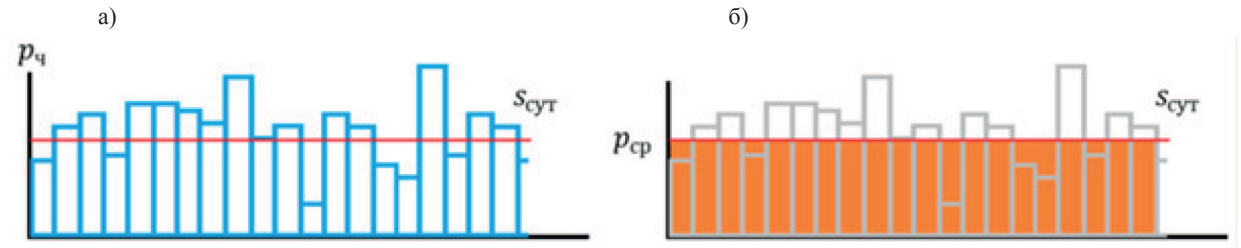


Рис. 2. Среднесуточные значения случайной (*а*) и детерминированной (*б*) величин

Свойства случайной величины (требуемого количества оборудования, определяемого исходя из случайной часовой потребности в нем) могут учитываться при переходе к детерминированному значению различным образом. Если задача ставится так, что поступающие часовые заявки на выполнение операций могут становиться в очередь и дожидаться освобождения занятого оборудования сколь угодно долго, то в данном случае арифметического расчета средних значений количества оборудования будет вполне достаточно. Ценой за это будет появление очереди на обслуживание, длина которой будет являться случайной величиной, производной от главной случайной величины — требуемого часового количества оборудования.

Если задача ставится так, что процедуру обслуживания должны пройти все поступившие в этот час заявки, то требуется найти максимально возможное значение базовой случайной величины — требуемого часового количества оборудования. Если задача состоит в нахождении определенного баланса между ожиданием заявок в очереди (вследствие мгновенного дефицита оборудования) и простоем оборудования (вследствие его мгновенного дефицита), то необходимо получить распределение базовой случайной величины. Очередь заявок может быть ограничена по длине или временем ожидания, что также определяется статистическими свойствами базовой случайной величины. Как следствие, для всех задач, в той или иной степени, требуется знание закона распределения базовой случайной величины — требуемого часового количества оборудования.

Методы статистических испытаний (методы Монте-Карло). Пусть известна функция распределения случайной величины X или $F(x) = P(X < x)$. Областью определения для нее являются возможные значения случайной величины, областью значений — интервал от 0 до 1. Если генерировать случайные числа, равномерно распределенные на этом интервале, и находить для каждого из них прообраз из области определения функций, то «гуще» эти значения будут располагаться там, где кривизна функции распределения больше (рис. 3).

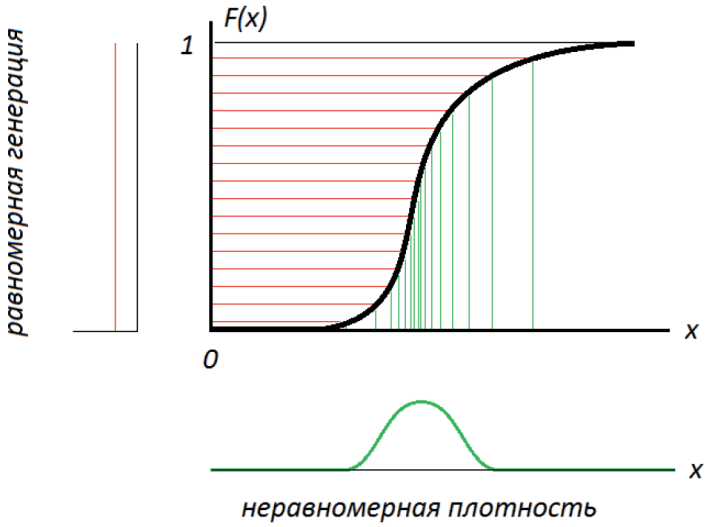


Рис. 3. Получение значений случайной величины по заданному закону

С ростом числа проведенных опытов частота наблюдаемых в результате значений будет приближаться к плотности вероятности исходной случайной величины. Этот метод называется *методом обратной функции*, поскольку значения случайной величины находятся как значения $F^{-1}(y)$ от генерируемых равномерно распределенных случайных аргументов $y \in [0; 1]$.

Пусть известно также, что расчетный годовой объем составляет 365000 операций. Среднесуточное значение составляет 1000 операций в сутки, что является математическим ожиданием рассматриваемой случайной величины. Если известен предполагаемый закон распределения, то это позволяет генерировать конкретные значения этой величины (рис. 4).

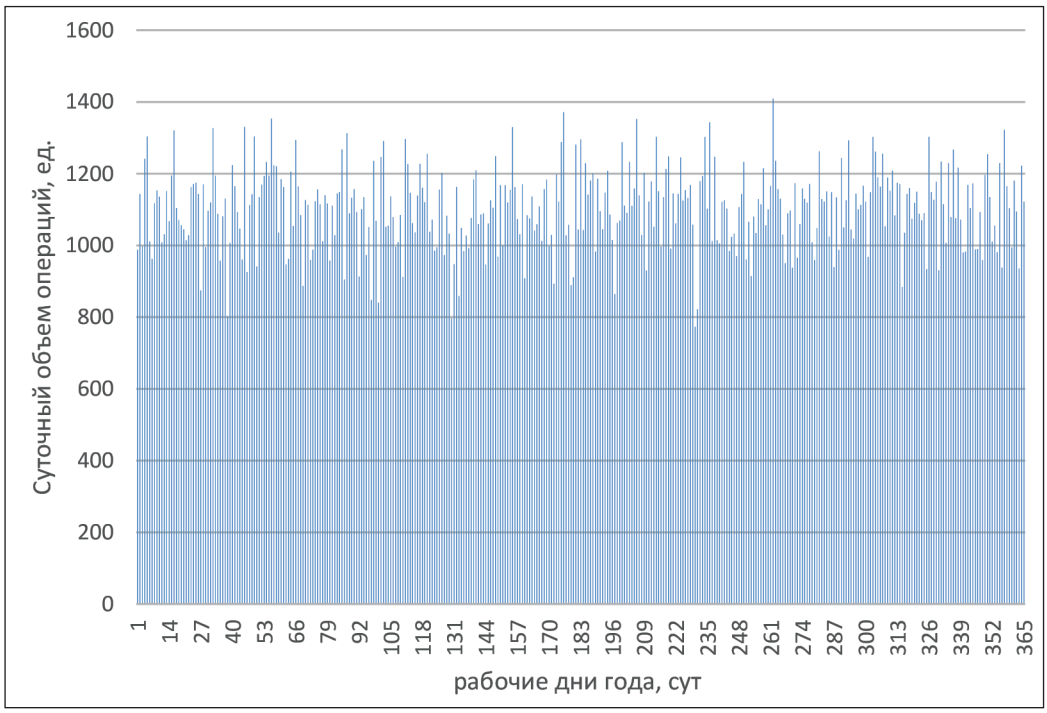


Рис. 4. Генерация суточных объемов операции как случайной величины

В свою очередь, каждое из сгенерированных значений суточного объема является суммой 24 почасовых объемов операций, что позволяет аналогичным образом для каждых отдельных суток сгенерировать распределение требуемого почасового объема операций, которое будет точно так же колебаться вокруг среднего значения в 42 операциях в час. Наконец, генерация случайной величины (часовой производительности единицы оборудования) позволяет пересчитать полученный для каждого часа объем операций в соответствии с требованиями, предъявляемыми к количеству оборудования (рис. 5).

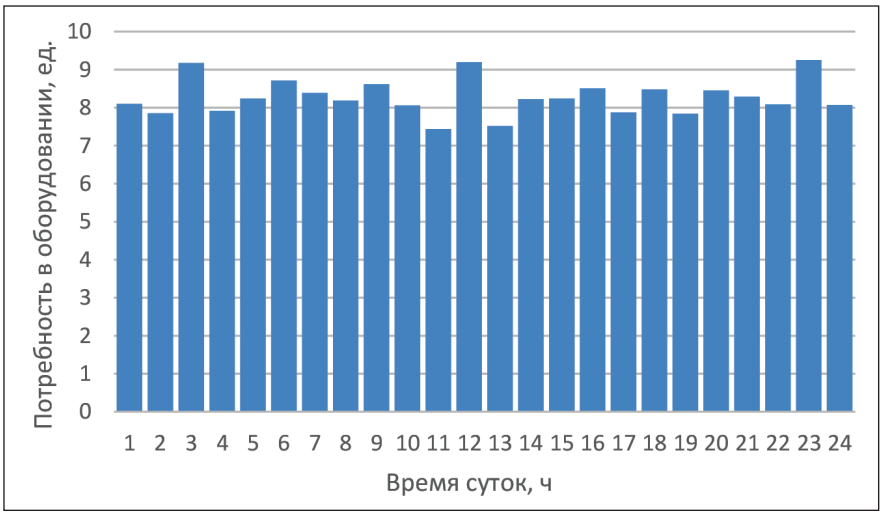


Рис. 5. Оценка потребности в оборудовании по часам одних суток

В рассматриваемом примере средняя часовая производительность была принята на уровне пяти операций в час. Как видно, потребность в оборудовании прогнозируемо колеблется вокруг значения, составляющего чуть более восьми единиц. Если теперь выполнить генерацию 365 суточных значений и для каждого из них сгенерировать 24-часовые потребности, получим 8760 раз-

личных примеров часовой потребности, которые дадут то же число различных значений численности оборудования. При тех же средних значениях генерация значений с большей величиной разброса (задаваемых среднеквадратическим отклонением) будет приводить к увеличению разброса требований к численности оборудования. На рис. 6 приведен пример статистической обработки такого годового эксперимента, откуда видно, что различие требований к численности оборудования от часа к часу может быть достаточно большим: при одних и тех же средних значениях в отдельные часы спрос может в разы превышать средние значения.

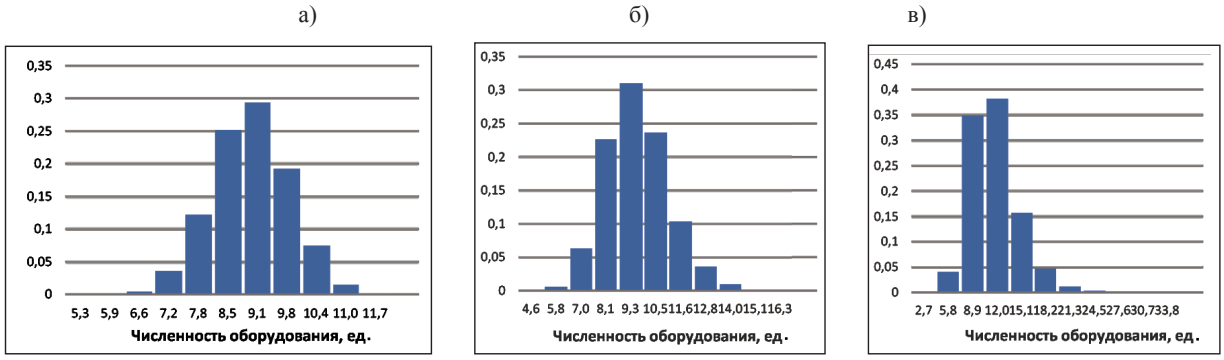


Рис. 6. Оценка частоты потребности в оборудовании при малом (*а*), среднем (*б*) и большом (*в*) разбросе параметров

Кроме того, приведенные ранее рассуждения касались лишь астрономического бюджета времени. Если не все дни года являются рабочими, а в сутках не все часы — рабочими, то требования к численности оборудования будут возрастать. На рис. 7 представлена гистограмма оценки требований к численности оборудования, полученная на основании предположения о 330 рабочих днях и 20 рабочих часах в сутки при среднем разбросе параметров.

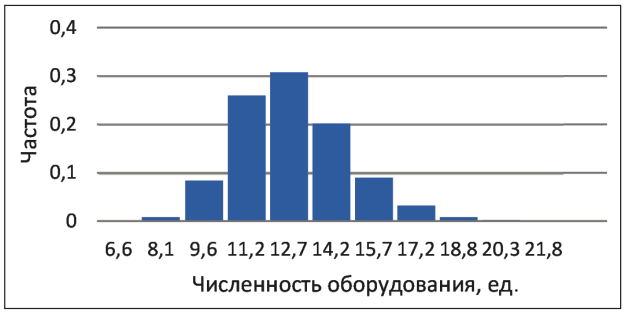


Рис. 7. Оценка потребности в оборудовании при реальном бюджете рабочего времени

Если задача состоит в том, чтобы все часовые задания были непременно выполнены, то количество оборудования должно находиться из условия максимума. В то же время, как показывает рис. 7, этот максимум может быть достаточно велик, а его значение может встречаться крайне редко. При распределении для выполнения операций меньшего количества оборудования периодически будет возникать его дефицит и избыток (простой). Размеры этого дефицита при различных выбранных значениях оборудования для выполнения операций показаны рис. 8.

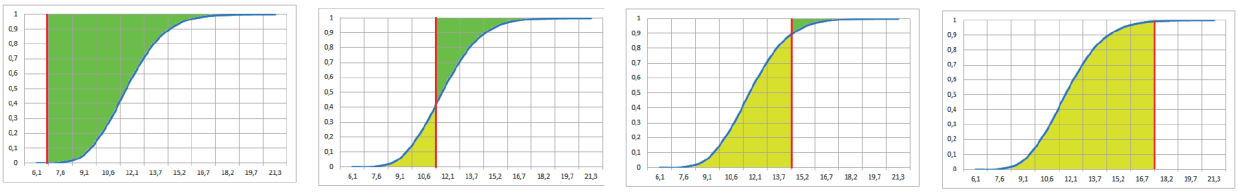


Рис. 8. Дефицит и избыток оборудования при различных установленных количествах

График суммарного объема потерь от дефицита и избытка как функции от численности установленного для совершения операций оборудования приведен на рис. 9.

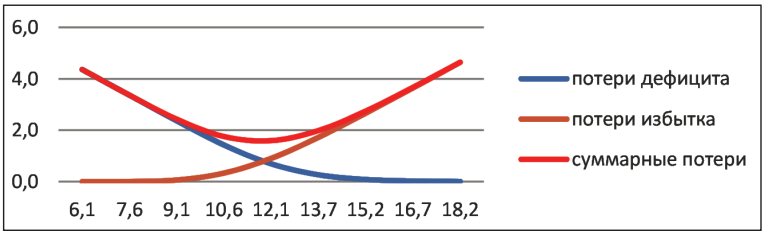


Рис. 9. Суммарные потери от избытка и дефицита оборудования

Минимум суммарных потерь будет определять оптимальную в смысле совокупных потерь численность оборудования. При различных последствиях потерь от дефицита оборудования и его избытка им могут быть приписаны различные веса: $w_1 + w_2 = 1$, которые будут сдвигать суммарную кривую в ту или иную сторону (рис. 10).

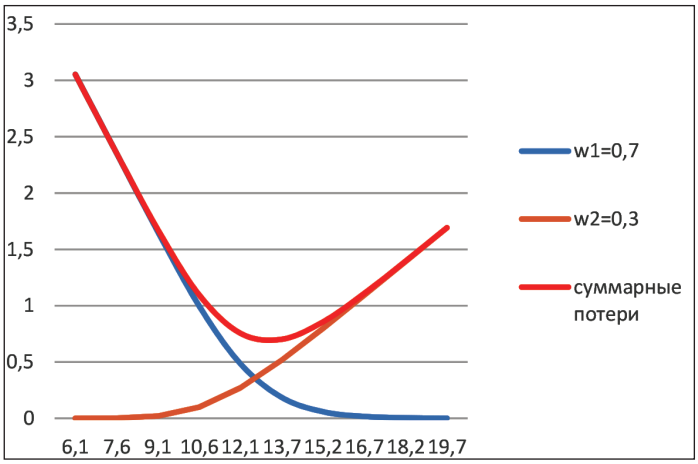


Рис. 10. Взвешенные суммарные потери от избытка и дефицита оборудования

Таким образом, описанные методы статистических испытаний представляют собой варианты исторически первого метода имитационного моделирования — статистических испытаний, или метода Монте-Карло, к недостаткам которого относится необходимость знания законов распределения случайных величин, описывающих параметры моделируемой системы. Кроме того, эти законы предполагаются стационарными, т. е. не меняющимися на протяжении моделируемого периода. Во многих практических случаях это является препятствием для их использования.

Статистическое моделирование методом генерации сценариев. Достаточно часто заданный объем операций обнаруживает определенную периодичность, цикличность или иные особенности. Например, ноябрьские и декабрьские объемы международных перевозок имеют тенденцию к росту из-за рождественской и новогодней торговли, в понедельник и пятницу поток автотранспорта на терминал возрастает из-за выходных, ночью складские операции имеют низкую интенсивность, которая обнаруживает всплески утром и вечером, соответствуя началу и окончанию рабочих смен. Как следствие, адекватная генерация спроса на операции описанными ранее методами оказывается невозможной. Рассмотрение отдельных случаев минимальной, максимальной и типовой интенсивности оказывается слишком субъективным и трудоемким. Кроме того, часто непосредственно законы распределения не могут быть сформулированы в количественных категориях. Мониторинг и экспертные опросы, проводимые как процедура сбора исходных данных для проектирования и моделирования (как его важного этапа), зачастую формулируются в качественных, относительных категориях. Еще большую проблему создает то обстоятельство, что строго де-

терминированные значения присутствуют в расчетных грузопотоках наряду со случайными величинами с известными характеристиками, а также качественными понятиями (например, типа «высокая», «средняя» и «низкая» интенсивность).

Рассмотрим, например, требуемую часовую интенсивность в отдельные сутки. Пусть суточное задание тем или иным образом определено и составляет значение $Q_{\text{сут}}$. Пусть о часовой интенсивности в отдельные сутки будет известно следующее:

– в ряде случаев часовая интенсивность строго определена (детерминирована): например, продиктована необходимостью обработки в тот или иной час секции железнодорожного состава определенной длины и, следовательно, вместимости;

– в ином случае часовая интенсивность может быть оценена средним количественным значением (например, объемом поступающего в тот или иной час на терминал транспорта, обеспечивающего связь с морским портом);

– в иные интервалы интенсивность определяется качественными характеристиками: «высокая», «средняя», «низкая».

Для получения детерминированных числовых значений, которые позволяют выполнять любые математические операции с ними, будем проводить формирование операционного почасового графика в два этапа: на первом этапе формируется предварительный план-график, описывающий временные и количественные показатели суточной операционной деятельности терминала в качественных показателях; на втором — полученный предварительный план-график детализуется до исполнительного плана-графика в числовых значениях.

Оба плана-графика, как предварительный, так и исполнительный, представляют строки, составленные в соответствии с рабочими часами согласно существующим требованиям, предъявляемым к объему операций. В каждом элементе содержится заданная тем или иным способом информация об интенсивности соответствующей операции.

Для формирования предварительного операционного плана-графика выберем следующие символы, кодирующие интенсивность соответствующих операций в тот или иной час рабочего времени:

1. *Детерминированный код –N.* В этом случае производительность операций в данный час есть детерминированное значение $P_i = N$.

2. *Среднее значение N.* Кодировка в виде положительного целого значения задает среднее значение производительности операций в данный час МО $[P_i] = N$, вокруг которого колеблются сгенерированные значения с заданным разбросом.

3. *Средние качественные значения i*: «низкая интенсивность», «средняя интенсивность», «высокая интенсивность», $i \in [s, m, l]$. Качественное соотношение между этими категориями задается в параметрах модели в виде числовых отношений натуральных чисел *S*, *M*, *L*.

Формирование исполнительного операционного плана-графика выполняется следующим образом. Если в кодировке предварительного плана-графика использован код *–N*, то интенсивность соответствующей операции в данный час составляет детерминированное значение *N*. Если в кодировке предварительного плана-графика использован код *N*, то интенсивность соответствующей операции в данный час составляет случайное значение, распределенное по нормальному закону вокруг значения *N*. Степень разброса, или вариативность значений параметра, характеризуется задаваемым в параметрах модели среднеквадратическим отклонением. Если в кодировке всего суточного периода для той или иной операции были использованы символы *–N* и *N*, то нераспределенным из общего суточного задания *W* остается объем операций $V = W + \sum(-N) - \sum(N)$. Для распределения объема операций *V* каждому условному уровню (*s*, *m* и *l*) присваивается вес, задаваемый условными долями.

Пусть уровень *s* имеет n_s условных долей, уровень *m* — n_m условных долей, уровень *l* — n_l условных долей. Цена одной доли, таким образом, может быть рассчитана как $u = \dfrac{V}{\left(n_s N_s + n_m N_m + n_l N_l\right)}$,

где N_i — число символов i в суточной кодировке. Отсюда наличие символа i в кодировке того или иного часа устанавливает среднее значение часовой производительности операций в этот интервал как $P_i = n_i \cdot N_i$. Это значение, как и в предыдущем случае, является средним значением производительности в данный час МО[P_i], вокруг которого колеблются сгенерированные значения с заданным разбросом.

Пример. Пусть суточное задание составляет 1000 единиц, а суточная кодировка интенсивности операций задается последовательностью, приведенной в табл. 1.

Таблица 1

Суточная кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	–25	*s*	*s*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*s*	*s*	*s*	20	*s*	*s*	*s*	*m*	*m*	1	1	1	*m*	*s*	30	–15

В этом случае нераспределенный объем составит V = 1000 – 25 – 20 – 30 – 15 = 930. Пусть относительные веса заданы соотношением n_s: n_m: n_l: = 1 : 3 : 5. Тогда цена доли составит $u = \frac{930}{(1 \cdot 9 + 3 \cdot 8 + 5 \cdot 3)} u$ = 30 / (9 · 1 + 8 · 3 + 3 · 5) = 19. В данном случае кодировка символом *s* определяет математическое ожидание 19 · 1 = 19; кодировка символом *m* — математическое ожидание 19 · 3 = 57. Средними значениями часовой производительность в рассматриваемом примере будут служить величины, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения часовой производительности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	17	22	23	24
1000	25	19	19	57	57	57	57	57	19	19	19	20	19	19	19	57	57	95	95	95	57	19	30	15

Вокруг этих средних значений, в соответствии с приведенным ранее алгоритмом формирования исполнительного операционного плана-графика, могут быть сгенерированы случайные значения, например, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Часовая кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	17	22	23	24
1000	25	19,5	16	57	57	64	56	55	18	20	16	22	20	17	18	62	52	102	86	84	65	18	27	15

Распределение потребности в оборудовании с учетом производительности, понимаемой как случайная величина с тем же значением математического ожидания, равным пяти операциям в час, показано на рис. 11.

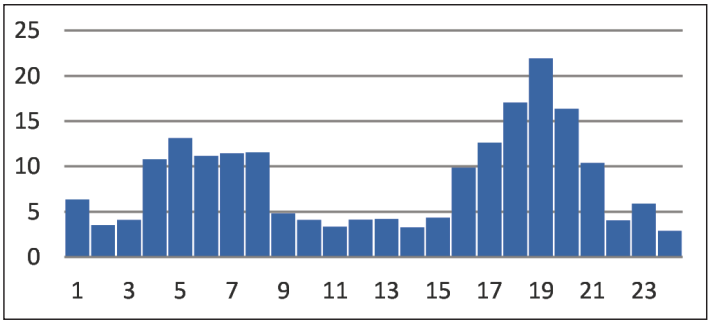


Рис. 11. Динамика часовой потребности в оборудовании

Среднее значение потребности в оборудовании (рис. 12) в этом случае по-прежнему составляет значение чуть более восьми единиц, однако плотность распределения этой случайной величины значительно отличается от показанной на рис. 6.

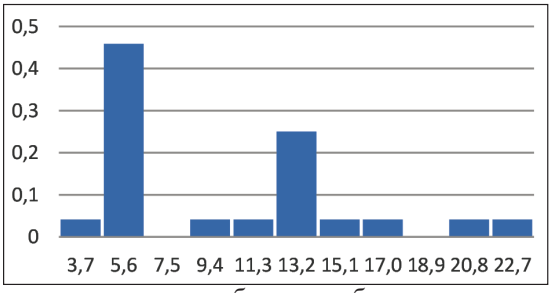


Рис. 12. Плотность распределения потребности в оборудовании по суточному сценарию

Различия настолько существенны, что использование вышеописанной методики становится весьма проблематичным. Очевидно, что критерии выбора численности оборудования в этом случае должны быть совершенно иные.

Имитационное моделирование. Имитационное моделирование в этом контексте используется в узком смысле как способ, позволяющий отличить этот подход от описанных ранее методов. Все они позволяли оценить исключительно меняющуюся во времени потребность в выполнении операций, никак не учитывая возможность их выполнения. Эта возможность определяется именно тем расчетным значением, которое призваны найти описанные процедуры.

В имитационном моделировании расчетное значение определяется как величина, позволяющая обеспечить приемлемое качество обработки поступающих заданий. В свою очередь, это качество обслуживания поступающих ежечасно заявок на выполнение операций характеризуется отношением между их немедленной обработкой и перенесением невыполненной части задания на следующий час, т. е. образованием очереди на выполнение операций.

Требования к оборудованию обладают высокой вариативностью, определяемой вероятностными характеристиками грузопотоков и параметрами их обработки, в то время как возможность предоставления оборудования по своей природе является если не постоянной, то, во всяком случае, гораздо более медленно меняющейся величиной.

Ранее отмечалось, что оборудование, количество которого соответствует средним значениям требований, в течение достаточно продолжительного интервала времени будет способно справиться с расчетным объемом операций, но за счет образования очередей. Чрезмерный объем выделенных для обработки грузопотока ресурсов будет способствовать устранению очередей, но вызывать потери, связанные с их недоиспользованием. Для определения оптимального соотношения потерь, связанных с образованием очередей, и потерь, связанных с простоем ресурсов, необходимо иметь средства для оценки размеров очередей.

Механизм образования очередей при динамически изменяющемся спросе на выполнение операций и фиксированном уровне ресурса на их выполнение показан на рис. 13.

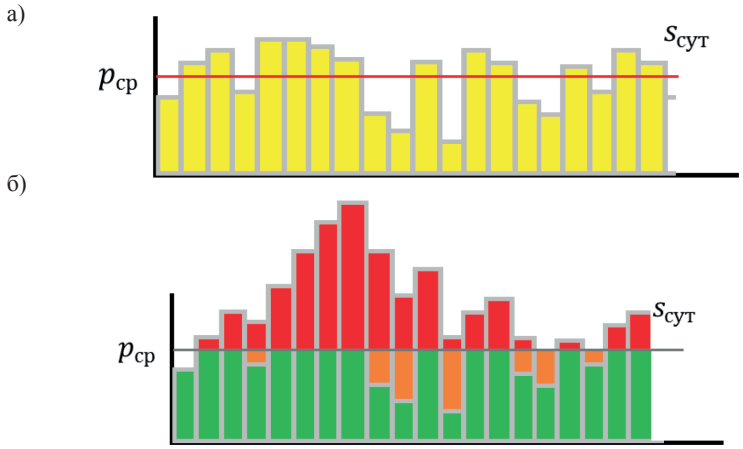


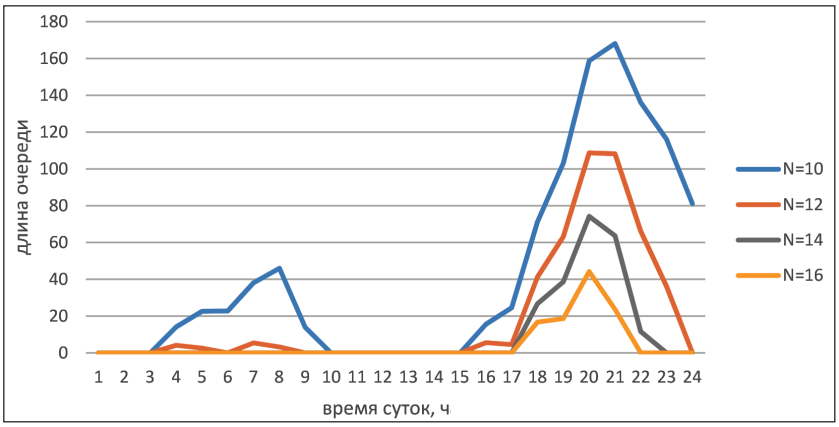
Рис. 13. Механизм образования очередей: *а* — динамически изменяющийся спрос на операции *б* — формирование очередей вследствие дефицита ресурса их выполнения

В отдельные интервалы времени требования к интенсивности выполнения операций превышают возможности их выполнения, предоставляемые имеющимся оборудованием. Вследствие этого часть заявок на операции остается невыполненной и переносится на следующий интервал (возникает очередь). Если и в следующий момент не удается справиться с текущим заданием и остатком от предыдущего, то очередь сохраняется; в противном случае она начинает сокращаться. В этом отношении моделируемая система выполнения операций перестает быть комбинаторной, в которой значения выходных параметров определяются только входными параметрами. Выходные параметры системы теперь начинают зависеть от ее состояния в данный момент времени, а состояние в следующий момент — от текущего состояния и входных величин. В кибернетике такие системы называются «автоматами с памятью». В первом приближении именно это свойство является границей, отделяющей аналитический, статистический и вариативный подходы от собственно имитационного моделирования в его современном понимании. Здесь моделируется не вариативность спроса на выполнение операций, а реакция системы с ограниченными ресурсами на вариативный спрос. Качество выполнения операций оценивается по параметрам образующейся очереди и это оцениваемое качество служит критерием выбора численности оборудования.

Основная идея моделирования очереди при дефиците оборудования проста: если имеющийся плановый объем операций на этот час плюс остаток от предыдущего часа меньше производительности распределенного для выполнения операций оборудования, то очереди в течение следующего часа не образуется, если же плановый объем плюс остаток больше производительности имеющегося оборудования, то очередь увеличивается на величину разности между этой суммой и производительностью имеющегося оборудования. Действие этого механизма иллюстрирует рис. 14, *а*, на котором показана динамика изменения длин очередей для рассматриваемого примера при разном количестве выделенного для выполнения операций оборудования на протяжении суток.

Моделирование на более продолжительном интервале подтверждает тот известный факт, что для обслуживания грузопотока в данном примере необходимо более восьми единиц оборудования — меньшее количество приводит к неограниченному возрастанию длины очереди (рис. 14, *б*).

а)



б)

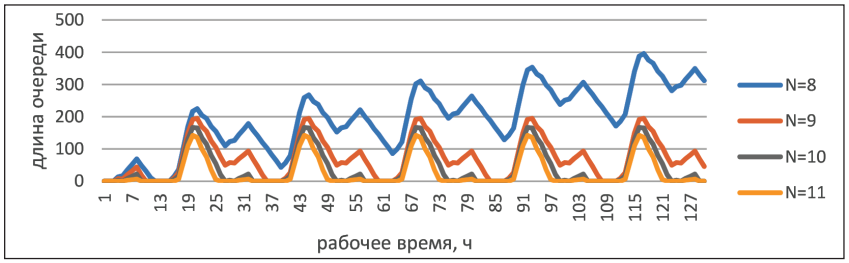


Рис. 14. Динамика образования очередей по времени при различной численности оборудования: *а* — на протяжении суток; *б* — на продолжительном интервале

С ростом числа используемого оборудования очередь уменьшается, однако полное ее исчезновение достигается лишь тогда, когда оборудование способно справляться с максимальными всплесками требуемой интенсивности операций (формируемыми как плановое поступление плюс накопившаяся очередь). На рис. 15 приведены результаты моделирования, позволяющие определить момент исчезновения очередей (он наступает при количестве оборудования, превышающем 20 единиц, т. е. в 2,5 раза больше среднего).

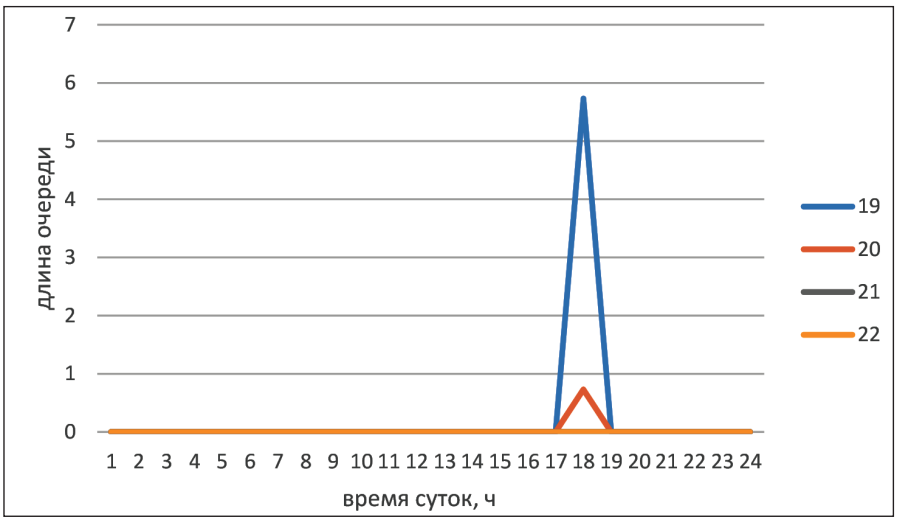


Рис. 15. Нахождение численности оборудования, устраняющего очереди

В статье описаны четыре различных модели: расчетно-аналитическая, модель статистических испытаний (Монте-Карло), статистическая модель генерации сценариев, имитационная модель. Каждая из них является определенным методическим развитием предыдущей и предназначена для получения некоторых дополнительных сведений, которые неспособна предоставить предшествующая модель. В то же время полученные с использованием предыдущих моделей данные носят менее специфический, а значит, более общий характер, что предполагает непротиворечивость и совместимость получаемых результатов «снизу – вверх».

Если в модели статистических испытаний принять все разбросы равными нулю, т. е. привести случайные величины к детерминированным средним значениям, результаты должны полностью совпадать с результатами расчетно-аналитической модели.

Если в методе «генерации сценариев» предположить равномерную вероятность распределения интенсивности операций по интервалам, то полученные результаты должны быть тождественны полученным с помощью модели Монте-Карло, а при дополнительном устранении разбросов параметров — результатам аналитических расчетов.

Если имитационную модель с анализом возникающих очередей привести к условиям работы предыдущих моделей, то она должна давать полностью совпадающие с ними результаты.

Таким образом, внутренняя структура все более сложных по строению и более богатых по спектру оцениваемых параметров должна последовательно повторять структуру предшествующих этапов развития моделей. В биологии такой принцип онтогенеза известен давно и имеет название *рекапитуляции*. Этот важный закон эволюции вполне заслуживает заимствования и продуктивного использования для доказательства адекватности комплексных имитационных моделей. В такой постановке принцип рекапитуляции требует, чтобы в этих моделях были предусмотрены средства приведения более сложных систем к любым более простым, проверенным или проверяемым. Это приведение должно выполняться путем изменения внутренних параметров, не меняющих саму структуру более сложной модели. В таком случае обеспечивается не только адекватность, но и робастность создаваемой модели на каждом этапе ее развития. Иными словами, в идеальном случае созданная модель должна потенциально обладать свойствами

всех предшествующих более простых моделей, а не представлять собой разрозненный набор их отдельных реализаций.

В приведенном примере сведение модели статистических испытаний сводится к заданию нулевых среднеквадратических отклонений. Как видно из рис. 16, получаемые в этом случае результаты совпадают с аналитическим расчетом.



Рис. 16. Статистические испытания без разброса

К аналогичным результатам приводит использование вероятностного сценария, в котором все интервалы имеют одинаковую среднюю интенсивность, заданную любым однородным символом (табл. 4).

Таблица 4

Равномерная кодировка интенсивности операций

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1000	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*	*s*

Полученное в результате моделирования такого сценария распределение потребностей в оборудовании (рис. 17) совпадает с результатами моделирования Монте-Карло (см. рис. 8). Если при этом исключить разброс, то получаемый график будет полностью совпадать с представленным на рис. 16.

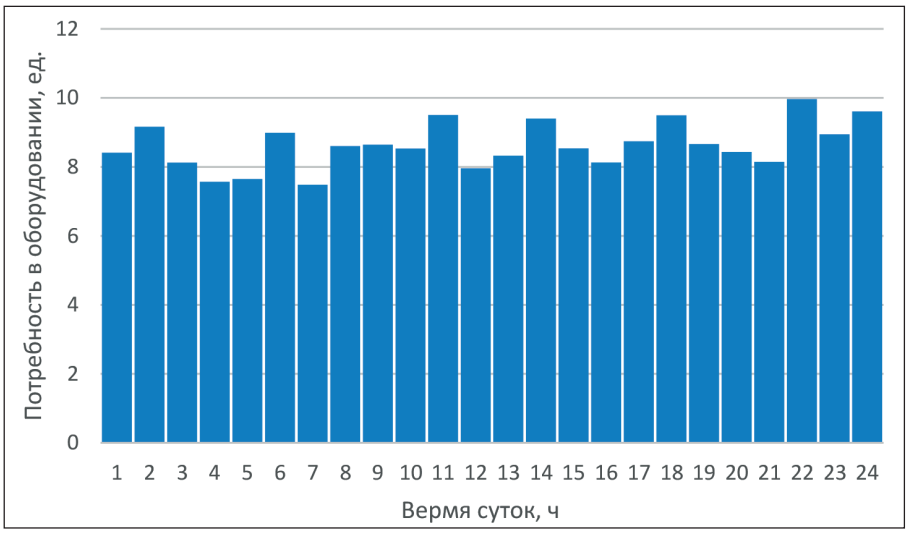


Рис. 17. Потребность в оборудовании при сценарии равномерного распределения

Имитационная модель должна показывать результаты, идентичные рассмотренным ранее. Например, анализ работы модели при равномерном распределении показывает неограниченный рост очереди при количестве оборудования, меньшем установленного значения 8,3 (рис. 18).

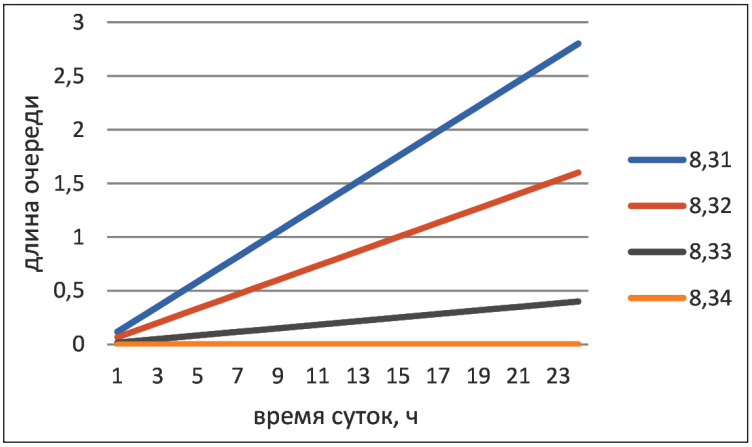


Рис. 18. Рост очереди при различном количестве оборудования

Обсуждение (Discussion)

В данной работе основные принципы имитационного моделирования и доказательства адекватности получаемых моделей были рассмотрены на примере одной операции. На практике такие технологические ресурсы, как оборудование, обычно используются для выполнения одновременно нескольких операций. В каждый отдельный момент времени динамика спроса на эти операции может превышать суммарное предложение этого ресурса, даже при его объеме выше средних операционных значений. В данном случае возникает задача рационального распределения имеющего ресурса между различными операциями. Распределенный таким образом технологический ресурс вызывает к жизни несколько иной механизм появление очередей, процесс образования которых должен моделироваться соответствующим образом.

Кроме того, выполняемые операции чаще всего выполняются с помощью оборудования, образующего связанные технологические линии. Распределение оборудование по отдельным звеньям также вызывает изменения в поведении моделируемой системы. При более детальном рассмотрении различного оборудования могут моделироваться взаимные помехи при работе оборудования в случае зависимости от изменяющихся внешних условий и действия непреодолимых сил. Все это составляет следующий уровень моделирования, который основывается на описанном в данной работе методологическом фундаменте и развивает полученную надстройку за счет более выразительных средств привлечением большего объема действующих факторов и оцениваемых параметров, развитых средств визуализации и регистрации.

Моделирование подобного детального уровня само по себе обычно не имеет смысла, поскольку целью является уточнение возможности поддержания интенсивности выполнения операций в конкретных объемах, определяемых моделированием более общего предыдущего уровня. В этом смысле детальное моделирование в основном касается уточнения уровня операционной производительности и использованного при этом «целеполагания». Условно эта фаза общей процедуры моделирования может быть названа *симуляционным моделированием* с целью отличия его от описанных в работе базовых моделей.

Выводы (Summary)

1. Моделирование является обязательным атрибутом современного подхода к проектированию, созданию и эксплуатации сложных технических объектов.

2. Методы моделирования, в зависимости от выбранного признака, могут быть разделены на разные классы, которые не противоречат, а дополняют друг друга.

3. Оптимальным инструментом для практики служат такие процедуры моделирования, которые используют модели разных классов, последовательно развивающих и уточняющих представления о моделируемом объекте.

4. В моделировании операций рациональной последовательностью является использование расчетно-аналитических моделей, моделей статистических испытаний, модели генерации вероятностных сценариев, а также имитационных моделей.

5. Указанная последовательность моделей не только позволяет поддерживать целостность и непротиворечивость данных в ходе проектирования объекта, но и доказывать адекватность используемых моделей, которые без этого утрачивают свое значение.

6. Наиболее детальное симуляционное моделирование, проводимое на уровне физических характеристик используемого оборудования, является важной и наиболее трудоемкой частью единой процедуры, и ее обособленное выполнение не имеет смысла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li S.* Planning inland vessel operations in large seaports using a two-phase approach / S. Li, R.R. Negenborn, G. Lodewijks // Computers & Industrial Engineering. — 2017. — Vol. 106. — Pp. 41–57. DOI: 10.1016/j.cie.2017.01.027.

2. *Moeller D .P. F.* From Motorways on the Sea to Motorways of the River: A Simulation-Based Decision Making Approach for Developing Dry Ports / D. P. F. Möller // Proceedings of the 2012 grand challenges in modeling & simulation (GCMS '12). — 2012. — Vol. 44. — Is. 11. — Pp. 171–176.

3. *Taner M. E.* Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals / M. E. Taner, O. Kulak, M. U. Koyuncuoğlu // Computers & Industrial Engineering. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.

4. *Da Silva D. M.* Analysis of river/sea transportation of ore bulk using simulation process / D. M. da Silva, M. Ventura // Maritime Technology and Engineering. — CRC Press, 2015. — Vol. 1. — Pp. 109–118.

5. *Sun Z.* MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals / Z. Sun, L. H. Lee, E. P. Chew, K. C. Tan // Advanced Engineering Informatics. — 2012. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.

6. *Bin L.* Study on modeling of container terminal logistics system using agent-based computing and knowledge discovery / L. Bin, L. Wen-Feng, Z. Yu // International Journal of Distributed Sensor Networks. — 2009. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 36–36. DOI: 10.1080/15501320802524029.

7. *Kuznetsov A. L.* Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment / A.L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2016. — Vol. 10. — Nr. 3. — Pp. 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

8. *Kuznetsov A. L.* Simulation for assessment of bulk cargo berths number / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. E. Slitsan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 87. — Pp. 062010. DOI:10.1088/1755-1315/87/6/062010.

9. *Marinacci C.* Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models / C. Marinacci, A. Quattrini, S. Ricci // 11th International Workshop On Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modeling & Simulation (HMS 2008). — 2008. — Pp. 190–201.

10. *Maruri L.* A Simulation of a container transport system between port and inland terminal depots / L. Maruri, L. Nuñez, A. Vidarte, J. M. Ezquerra // 1st International Industrial Simulation Conference. — 2003. — Pp. 238–242.

11. *Ottjes J. A.* Simulation of a new port-ship interface concept for inter modal transport / J. A. Ottjes, H. P. M. Veeke // Proc. of the 11th European Simulation Symposium. — 1999. — Pp. 227–231.

12. *Кузнецов А. Л.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.

REFERENCES

1. Li, Shijie, Rudy R. Negenborn, and Gabriel Lodewijks. "Planning inland vessel operations in large seaports using a two-phase approach." *Computers & Industrial Engineering* 106 (2017): 41–57. DOI: 10.1016/j.cie.2017.01.027.

2. Moeller, Dietmar P. F. "From Motorways on the Sea to Motorways of the River: A Simulation-Based Decision Making Approach for Developing Dry Ports." *Proceedings of the 2012 grand challenges in modeling & simulation (GCMS '12)*. 2012. Vol. 44. Is. 11. Pp. 171–176.

3. Taner, Mustafa Egemen, Osman Kulak, and Mehmet Ulaş Koyuncuoğlu. "Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals." *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014): 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.

4. Da Silva, D. Merino, and M. Ventura. "Analysis of river/sea transportation of ore bulk using simulation process." *Maritime Technology and Engineering.* Vol. 1. CRC Press, 2015. 109–118.

5. Sun, Z., L. H. Lee, E. P. Chew, and K. C. Tan. "MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals." *Advanced Engineering Informatics* 26.1 (2012): 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.

6. Bin, Li, Li Wen-Feng, and Zhang Yu. "Study on modeling of container terminal logistics system using agent-based computing and knowledge discovery." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 5.1 (2009): 36–36. DOI: 10.1080/15501320802524029.

7. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.3 (2016): 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

8. Kuznetsov, A. L., A.V. Kirichenko, and A. E. Slitsan. "Simulation for assessment of bulk cargo berths number." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87. No. 6. IOP Publishing, 2017. DOI:10.1088/1755-1315/87/6/062010.

9. Marinacci, Cristiano, Andrea Quattrini, and Stefano Ricci. "Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models." *11th International Workshop On Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modeling & Simulation (HMS 2008)*. 2008. 190–201.

10. Maruri, Leire, Laura Nuñez, Ana Vidarte, and José Manuel Ezquerra. "Simulation of a Container Transport System Between Port and Inland Terminal Depots." *1st International Industrial Simulation Conference*. 2003. 238–242.

11. Ottjes, J.A., and H.P.M. Veeke. "Simulation of a new port-ship interface concept for inter modal transport." *Proc. of the 11th European Simulation Symposium*. 1999. 227–231.

12. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кузнецов Александр Львович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *thunder1950@yandex.ru*, *kaf _pgt@gumrf.ru*	**Kuznetsov, Aleksandr L.** — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation e-mail: *thunder1950@yandex.ru*, *kaf _pgt@gumrf.ru*
Кириченко Александр Викторович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *KirichenkoAV@gumrf.ru*	**Kirichenko, Aleksandr V.** — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation e-mail: *KirichenkoAV@gumrf.ru*
Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Логистический Парк «Янино» Российская Федерация, Ленинградская область, Всеволожский район, д. Янино-1, Торгово- логистическая зона «Янино-1», №1 e-mail: *victorysch@mail.ru*	**Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N.** — PhD, Chief Executive Officer Yanino Logistics Park LLC Vsevolozhsky District, Yanino-1 village, Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1, Leningrad Region, Russian Federation e-mail: *victorysch@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-275-286

THE TASK OF SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF THE MARITIME PASSENGER TERMINAL

N. N. Maiorov

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The possibility for solving the problem of synthesizing the structure of the marine passenger terminal has been evaluated. The relevance of this is determined on the one hand by the observed increase in the intensity of cruise and passenger vessels and the increase in passenger traffic, on the other hand, the needed progress in finding certain best system parameters. At the same time, carrying out experiments with already constructed sea terminals is quite problematic. This problem can be solved only by synthesis, construction of a family of objective functions in analytical form and practical realization of the obtained functional in the simulation model. The construction of the objective function requires taking into account the boundary conditions, limitations and inclusion of key performance indicators. The model suggests the inclusion of a function that describes the influence of the external environment. The task of providing the equipping of the sea passenger port with appropriate equipment, appropriate logistical support and the involvement of specialists is one of the main items of the terminal budget. In this aspect, the synthesis problem is reduced to the problem of parametric synthesis. The article presents models of research the processes related to cruise ships, as well as technological processes of passenger services. Then we analyze the processes separately and justify the use of the family of models at the micro level. This determined the inefficiency of using generalized models, which can be represented with the help of the system dynamics technique. The simulation model will allow us to refine the results obtained, to determine the spatial location of the equipment, technical parameters and will allow us to use real statistical values in the model. The selection of needed equipment and the introduction of appropriate parameters and boundary conditions for the processes are formed by the decision maker. As a result, a set of analytical data is formed, on the basis of which the decision-maker will select a set of related parameters to ensure that the required indicators are met. The results in this case will be the basis for the formation of a feasibility study. The constructed objective function can be supplemented by a certain set of variables describing the existence of possible unique processes. The object of the research was the sea passenger port "Marine Facade". The correctness of the results is confirmed by the parametric synthesis and simulation results.

Keywords: performance indicators, marine passenger terminal, simulation, structure synthesis, performance, collateral level, objective function.

For citation:
Maiorov, Nikolaj N. "The task of synthesis of the structure of the maritime passenger terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 275–286. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-275-286.

УДК 65.012.1, 656.072

ЗАДАЧА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТЕРМИНАЛА

Н. Н. Майоров

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья содержит предложения по решению задачи синтеза структуры морского пассажирского терминала. Актуальность этого обосновывается, с одной стороны, наблюдаемым увеличением интенсивности круизных и пассажирских судов и увеличением пассажиропотока, с другой — необходимостью достижения определенных наилучших параметров работы. При этом проведение экспериментов с уже построенными терминалами достаточно проблематично. Данная задача может быть решена только синтезом, а также построением семейства целевых функций в аналитическом виде и в виде практической реализации полученного функционала в имитационной модели. Построение целевой функции требует учета

граничных условий, ограничений и включения ключевых показателей производительности. В модель предлагается включить функцию, описывающую влияние внешней среды. Задача обеспечения оснащения морского пассажирского порта соответствующим оборудованием с надлежащим материально-техническим обеспечением и привлечением специалистов является одной из основных статей бюджета терминала. В данном аспекте задача синтеза сводится к задаче параметрического синтеза. В статье представлены модели исследования процессов как связанных с круизными судами, так и технологические процессы обслуживания пассажиров. Представлен анализ процессов по отдельности и обосновывается использование семейства моделей на микроуровне. При этом обосновывается неэффективность использования обобщенных моделей, которые можно представить с помощью методики системной динамики. Имитационная модель позволит уточнить полученные результаты, определить пространственное расположение оборудования и технических параметров, а также даст возможность использовать в модели реальные статистические значения. Выбор оборудования и ввод в модель соответствующих параметров и граничных условий в процессе обработки пассажиропотока формирует лицо, принимающее решение. В результате формируется набор аналитических данных, на основании которых лицо, принимающее решение, выберет набор связанных параметров, обеспечивающих выполнение требуемых показателей работы. Результаты в данном случае будут основой для формирования технико-экономического обоснования для морского пассажирского терминала. Построенная целевая функция может быть дополнена определенным набор переменных, описывающих наличие возможных уникальных процессов. Объектом исследования был выбран морской пассажирский порт «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург). Правильность полученных результатов подтверждается параметрическим синтезом и результатами моделирования.

Ключевые слова: показатели производительности, морской пассажирский терминал, имитационное моделирование, синтез структуры, производительность, уровень обеспечения, целевая функция.

Для цитирования:
Майоров Н. Н. Задача синтеза структуры морского пассажирского терминала / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 275–286. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-275-286.

Введение (Introduction)

Современные процессы в мировой экономике напрямую влияют на развитие и изменение морских портов, терминалов и транспортных систем. Особое внимание необходимо уделить пассажирским терминалам, так как в последнее время наблюдается значительное увеличение пассажиропотока и интенсивности работы круизных судов в Балтийском море. Динамичное влияние внешней среды вынуждает такие системы к проведению активного поиска новых клиентов, поиска путей расширения направлений, привлечения новых компаний и использования новых интеллектуальных технологий для обеспечения лидерских позиций. Данному условию соответствует наблюдающееся развитие различных логистических сервисов, которые предлагают своим клиентам различные морские пассажирские терминалы. Наличие возможной конкуренции между различными терминалами, расположенными в одном регионе на одной территории, также способствует этому. Кроме того, необходимо также учитывать существующие технологические различия терминалов, участвующих совместно в процессе обработки судов и пассажиропотока. Хорошо известно, что именно на «стыках» различных терминалов и транспорта находятся основные резервы ускорения продвижения и сокращения возможных дополнительных транспортных издержек, повышения качества транспортных услуг и сервисов, а также создается благоприятная среда для построения транспортных логистических цепей.

Необходимо также отметить наличие географических особенностей портов и терминалов и экономические особенности регионов, которые определяют их технологические особенности. Включение данных условий значительно усложняет подходы к исследованию морских пассажирских терминалов. Подавляющее большинство транспортных систем, участвующих в обработке грузопотока, технологически и организационно разобщены, в отличие от сферы пассажирских перевозок. В процессе анализа соответствующего сегмента можно сформировать единое поле транспортно-логистических услуг и сформировать модель работы системы для исследования всей системы портов и терминалов. Для построения такой модели необходимо четко определить целевую функцию системы. При решении различных задач пассажирских портов

на микроуровне имеется большой объем известных моделей, методов и инструментов для их исследования путем моделирования, в отличие от макроуровня и комплексного представления системы.

Актуальными задачами являются вопросы постановки и формализации задач синтеза структуры, разработки соответствующих оптимизационных и имитационных моделей, а также построения на их основе процедур синтеза структуры морских портовых систем, позволяющих учитывать динамику функционирования элементов систем. Исследование данных задач необходимо как для обеспечения систем управления (обеспечения точности и качества работы, операционного быстродействия и ряда других факторов), так и для решения вопросов прогнозирования развития терминалов на определенный период планирования.

При синтезе портовой системы необходимо определять структуру процессов и параметров исходя из требуемых характеристик. Ввиду сложности такой системы в ряде случаев эти требования могут различаться, и лицу, принимающему решение, потребуется искать некий компромисс. Для решения поставленных задач в статье под процессом синтеза понимается задача выбора параметров морских пассажирских портов и определения необходимых структурных изменений некоторой уже имеющейся системы, направленной на обеспечение требуемого качества работы. Параметр качества работы, или положение состояния системы [1], [2], является изменяющимся во времени параметром, так как на его формирование оказывает влияние окружающая экономическая среда и региональные особенности. Необходимо отметить, что задача синтеза структур является трудно формализуемой ввиду требования учета большого числа параметров системы.

С общих позиций система пассажирского морского терминала, как правило, имеет следующую организационно-функциональную структуру:

1. Подсистема организационного обеспечения, подсистема обработки круизных и паромных судов и морских причалов.

2. Подсистема информационного обеспечения, являющаяся организующим звеном работы системы и выполняющая информационный обмен.

3. Пассажирский терминал, являющийся производственным звеном, местом выполнения всех технологических операций с пассажиропотоком.

4. Подсистема сервисного обеспечения, планирования работ и обеспечения сопровождения обеспечения судов и пассажиропотоков.

Примем, что изначально известна некая структура портовой системы, которая определена на уровне первоначального проектирования. Однако при этом возникает вопрос: *отвечает ли данная система пассажирского морского терминала условиям, которые диктует экономическая ситуация*? При решении задачи синтеза происходит определение параметров портовой системы для обеспечения оптимальных условий, что требует анализа большого числа данных и граничных условий. При представлении данной модели в аналитическом виде появляется возможность повысить качество управления объектом и обосновать необходимые модернизации, а также расширить и обосновать введение новых терминалов в порту.

Методы и материалы (Methods and materials)

Известно, что теоретически для обеспечения наилучших показателей работы издержки должны быть минимизированы. В реальных системах сложно достичь точных значений параметров системы, поэтому при решении задач прогнозирования вводится понятие «достижение уровня». Задача оснащения морского пассажирского порта современным оборудованием, соответствующим требованиям материально-технического обеспечения, и привлечение специалистов является одной из основных статей бюджета терминала. Следовательно, задача синтеза сводится к задаче параметрического синтеза.

Для повышения эффективности функционирования пассажирского порта или терминала необходимо выбрать такое количество технического оборудования и персонала и организовать

технологический процесс обработки таким образом, чтобы загрузка ресурсов была максимальной, но при этом порт должен справляться с поставленными задачами и постараться обеспечить требуемые нормы работы оборудования и соблюдения графиков. К примеру, в случае наличия возможности введения новых причалов появляется возможность привлечения большего количества круизных судов. Вследствие этого увеличится нагрузка на персонал, если его число не было увеличено, что может повысить, к примеру, вероятность человеческих ошибок и сбоев в обслуживаемом оборудовании. Для того чтобы избежать ошибок, необходимо *правильно изначально определять целевую функцию системы*.

Объектом исследования являются пассажирские морские терминалы и причальные комплексы в г. Санкт-Петербурге. Под морским пассажирским терминалом понимается совокупность объектов инфраструктуры морского порта, технологически связанных между собой и используемых для осуществления операций с грузами и обслуживания пассажиров. Необходимо отметить, что любой терминал имеет уникальные особенности, обусловленные геометрией его построения и внутренним устройством, что необходимо учитывать при размещении оборудования и исследовании пассажиропотоков [3], [4]. На данный момент такими наиболее крупными являются морской пассажирский порт «Морской фасад» и комплекс «Морской вокзал». Комплекс порта «Морской фасад» включает семь причалов для приема океанских лайнеров, три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал.

Нормативные документы, описывающие требования к технологическим процессам в порту, приведены в [5] и в основном реализованы в форме линейных структур. В [6] исследована информация о пиковых нагрузках на пассажирский порт «Морской фасад». В течение навигации 2017 г. (с 16 мая по 19 сентября 2017 г.) представлено 49 дней навигации, когда были зафиксированы пиковые нагрузки. Количество таких дней по отношению к дням всей навигации составило 32 % от общего количества дней работы пассажирского порта. По сравнению с 2009 г. пассажиропоток увеличился в 2,26 раз, а количество круизных лайнеров возросло в 2,16 раза. Все это свидетельствует о росте в сегменте пассажирских морских перевозок и необходимости проведения процедуры синтеза структуры. Статистика работы терминала в 2017 г. приведена в табл. 1.

Таблица 1

Статистика работы терминала

2017 г.	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Всего
Пассажиропоток, чел.	0	213161	335754	13189	562104
Количество лайнеров, шт.	0	98	146	5	249

Целевая функция оптимизации структуры и процесса функционирования морского пассажирского терминала является многопараметрической и многокритериальной. При ее реализации необходимо учитывать число пассажирских терминалов, причалов, интенсивность захода судов. В общем виде целевую функцию можно представить в следующем виде:

$$T(I,\ W,\ S,\ G,\ U)\ =\ [F_1(I,\ W,\ S,\ G,\ U) \to \max,\ \ldots\ , F_m(I,\ W,\ S,\ G,\ U) \to \max], \qquad (1)$$

где T — вектор критериев оценки эффективности работы пассажирского морского порта; F_1, ..., F_m — критерии эффективности работы отдельных портовых терминалов и причалов; I — вектор параметров, описывающих структуру входящего потока круизных судов и дополнительного транспорта; W — вектор параметров, описывающих структуру исходящего потока транспорта и паромных судов; S — вектор параметров, характеризующих техническую оснащенность терминалов и причалов; G — вектор параметров, описывающих график работы и организацию обработки пассажиропотока и сопутствующего грузопотока; U — вектор параметров, характеризующих сервисы и услуги, которые предоставляют терминалы.

Примем следующее допущение о том, что ситуация на рынке услуг стабилизировалась на определенном равновесном уровне, и входящие параметры в систему порта остаются неизмен-

ными. При использовании такого подхода и при последующих упрощениях под значениями достижения «max / min» понимается нахождение экстремумов функций, подразумевающих достижение максимальной прибыли и минимальных издержек. Кроме того, можно внести критерии выбора условий для достижения быстроты обработки пассажиров и круизных судов. В аналитической форме эти критерии формируют следующую систему целевых функций работы морского пассажирского терминала:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{c} l_k T_k - \sum_{i=1}^{p} L_{k1} T_{ik}(S,G) \to \min; \\ C_i n_i(S,G) + \sum_{j=1}^{h} (C_{j1} + C_j W_j) + \sum_{k=1}^{c} C_k L_k^1 T_k(S,G) + C_k L_k^2 T_{k1}(S,G) \to \min; \\ F_i(\alpha_i) \to \min; \\ \sum_{j=1}^{h} (K_j^{\max} - K_j(G,S)) \to \min \end{cases} \quad (2)$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} 0 \le K_j^{\max} \le 1, j \in 1...n; \\ a_i \le \alpha \le b_i, \alpha \in 1...n, b \in 1...n; \\ T_{kj}^{\max}(G,S) \le T_{kj}^{\max}, j \in 1...p, k \in 1...c. \end{cases}$$

где p, c — количество технологических этапов по обработке пассажиропотока, количество заявок пассажиров в системе; h — количество ресурсов пассажирских терминалов (площадей и объемов терминалов, причалов); C_i – возможные задержки в обработке пассажиров или судов; $n_i(S, G)$ — количество судов, получивших задержки в течение определенного интервала времени; C_{j1} — стоимость эксплуатации j-го ресурса терминала в течение рассматриваемого времени; C_j — стоимость эксплуатации единицы площади терминала; W_j — площадь, занимаемая j-м ресурсом; C_k — штраф за ожидание обработки судна или возможный простой в работе терминала; L_k^1 — признак обработки определенного k-го судна; $T_k(S, G)$ — длительность разгрузки k-го судна; l_k — важность показателя длительности обработки k-го заказа для терминала; $T_{k1}(S, G)$ — длительность погрузки k-й заявки; L_k^2 — признак погрузки k-го заказа; T_k — требуемая длительность обработка судов; L_{k1} — признак прохождения i-го этапа k-м заказом в порту; $T_{ik}(S, G)$ — длительность i-го этапа обработки k-го заказа; $K_j(G, S)$ — загрузка j-го ресурса терминала; $K_j^{\max}$ — максимально возможная необходимая загрузка j-го ресурса порта; $T_{kj}^{\max}$ — максимально возможная длительность обработки заказа на j-м этапе технологических операций; $F_i(\alpha_i)$ — функция влияния внешней среды.

Включение переменной $F_i(\alpha_i)$ необходимо для учета влияния внешней среды. Стремление данной переменной к минимуму при данном подходе означает стремление системы к достижению стабильной работы терминала и отсутствию конкуренции на рынке между терминалами.

При синтезе структуры терминала происходит выбор оборудования для терминала между доступным на рынке. Каждый тип оборудования имеет свою производительность, стоимость создания, стоимость покупки или найма в аренду и эксплуатации с учетом материально-технического обеспечения и восстановления оборудования. Следовательно, на этапе определения типа и количества используемых ресурсов параметры задачи синтеза являются дискретными. Необходимо отметить, что такие функции, как $K_j(G, S)$, $T_{ik}(S, G)$ и другие, отражающие длительность работ и загрузки элементов, являются нелинейными функциями, поэтому при их исследовании желательно вводить разбиение на определенные временные интервалы.

На основании представленных позиций можно системно представить концепции производительности морских пассажирских терминалов в определении переменных факторов, элементов управления и показателей производительности (рис. 1).





Рис. 1. Системный подход к представлению критериев производительности морских пассажирских терминалов и общему направлению потоков в системе

На практике любые эксперименты с уже созданным пассажирским терминалом практически невозможны. При этом необходимо оперативно реагировать на любые изменения. Отработка различных «сценариев» возможна только на модели терминала. Для правильности последующего моделирования и интерпретации результатов необходимо выполнение теорем подобия и нахождение равенства инварианта подобия [7]. Поэтому на основе целевой функции следует установить соотношения между реальными параметрами процессов и их реализацией в имитационной модели.

Модель любого терминала в структуре порта строится на основе описания ее структуры и технологических процессов, которые, в свою очередь, включают описание всех технологических участков микроуровня. При описании структуры и работы терминала используется *метод декомпозиции*: терминал разделяется на составные элементы, в технологическом процессе выделяются основные функционально значимые операции. Терминал представляется как техническая система, состоящая из связанных элементов.

На рис. 1 показана схематичная структура одного пассажирского терминала с направлением пассажиропотоков. В исследуемой системе необходимо разграничить процессы, связанные с об-

служиванием судов и пассажиров. При исследовании процессов интенсивности заходов круизных лайнеров необходимо ответить на вопрос: *на какую интенсивность ориентироваться при расчете — среднюю, которая будет крайне редкой* (чаще всего реальные значения получаются ниже как компенсация пиковых всплесков), *или максимальную, которая будет наблюдаться лишь в течение некоторого пикового времени*. Для пассажирского терминала ключевым измеряемым параметром выбирается пассажиропоток, варьируемыми параметрами — вместимость круизного судна, количество причалов и интенсивность обработки судов на них. Условно схема данной модели относительно судов МПС (морской портовой системы) показана на рис. 2.

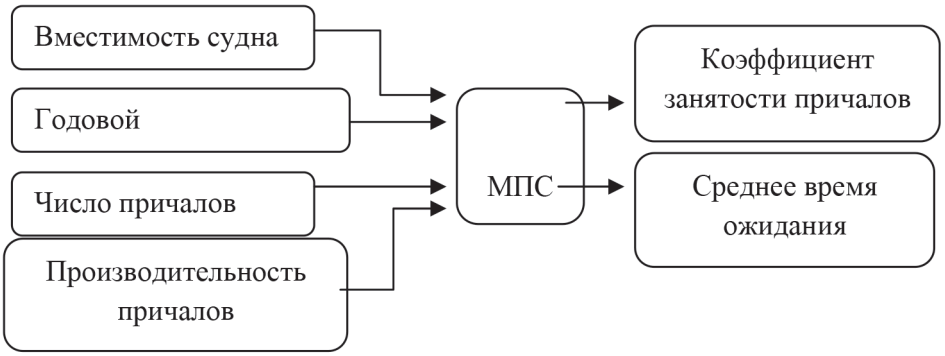


Рис. 2. Структура модели морского пассажирского терминала

В публикациях [8] и [9] представлены технологические операции по обработке пассажиропотока с заданной интенсивностью прихода круизных и паромных судов. На основе целевой функции и их представления была выполнена имитационная модель. Данная модель реализует работу круизно-паромного терминала в морском порту «Морской фасад». В ней учтены геометрические особенности терминала [10]. В результате исследования процессов, связанных с обслуживанием пассажиропотоков и круизных судов, была составлена табл. 2, указывающая участки морского пассажирского терминала, которые необходимо моделировать для анализа каждой технологической операции.

На основании представленной целевой функции открывается возможность выполнить моделирование работы всего комплекса причалов на практике, представленных в модели по отдельности. На вход данной модели поступают данные об интенсивности заходов круизных и паромных судов в течение навигации, причалов, к которым они швартуются, о количестве пассажиров, а также о необходимом оборудовании и требования, предъявляемые к нему. Примеры моделей на микроуровне приведены в [11], [12]. Проанализировав их, можно отметить, что в каждом случае исследования достигалось выполнение только определенных значений. В рассматриваемом случае в результате прогона модели в течение выбранного модельного времени, равного времени навигации, получаются числовые характеристики работы терминала, загруженности его ресурсов, «узкие» места, в которых возникают задержки, и условие правильности размещения оборудования.

В состав агентов включаются сотрудники терминала и в результате получаются параметры их загруженности. Так, при необходимости нахождения условий минимизации загрузки j-го ресурса (например, стоек регистрации) в модель на основе целевой функции вносятся ограничения, условие времени на обработку пассажира и устанавливается счетчик, считывающий каждую задержку как выход за рамки нормативного времени. Параметры входящего и исходящего потоков пассажиров круизных судов являются низменными при запуске моделей. Варьируемым параметром для модели являются количество и тип используемого оборудования. Как следствие, в модель необходимо включить выбор типа оборудования из имеющегося на рынке. Данный этап формирует самостоятельно лицо, принимающее решение. Каждый тип оборудования определяется производительностью, стоимостью эксплуатации C_{j1}, занимаемой площадью W_j и оказывает прямое влияние на процессы по обработке круизных судов и пассажиров. Наиболее подходящее оборудование определяется при достижении минимума издержек.

Таким образом, полученная модель характеризуется большим количеством варьируемых параметров и различными критериями оценки эффективности, что, безусловно, затрудняет поиск оптимальных вариантов структуры морского пассажирского терминала. Для поиска оптимальной структуры системы при определении конечного числа модельного времени, равного навигации, в имитационной модели можно использовать следующие способы:

1. *Поиск оптимальной структуры каждого участка по отдельности*. В этом случае необходимо наличие аналитических данных по участкам с сохранением их взаимосвязи.

2. *Использование модели при введении ограничений*, т. е. переход к обобщенной модели, позволяющий снизить точность моделирования и последующего анализа. В данном случае может идти речь о построении модели по принципам системной динамики.

Использование первого способа приводит к более правильному решению. При этом исходная задача разбивается на группу подзадач, с меньшим числом параметров каждая. Временные параметры в этом случае будут выбираться из набора статистических данных за прошлые временные периоды.

Результаты (Results)

В результате исследования представлен новый подход к решению задачи синтеза структуры морского пассажирского терминала и предложена новая целевая функция оптимизации структуры и процесса функционирования с учетом влияния воздействия внешней среды. Так как любые эксперименты с уже созданным пассажирским портом невозможно выполнить в реальности, результат, полученный при исследовании структуры с помощью аналитических моделей, является исходным условием для выполнения последующего имитационного моделирования участков. Без построения целевой функции невозможно выполнить качественное моделирование, так как в этом случае не будут учитываться все требуемые параметры. В противном случае модель станет очень обобщенной и будет неточной. Практическая реализация в форме имитационной модели позволит уточнить полученные результаты, определить пространственное расположение оборудования и использовать в модели реальные значения. При задании целевой функции сразу определяются области допустимых решений, что ускоряет процесс последующего анализа и принятия решения.

Задача поиска наилучшего функционирования терминала разбивается на семейство задач на микроуровне с учетом граничных условий. Результаты исследования взаимосвязи отдельных технологических процессов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Взаимосвязь между отдельными процессами и их моделированием

Участок морского пассажирского терминала	Процесс моделирования							
Моделирование работы причалов	+							
Досмотр пассажиров при входе в терминал		+						
Перемещение пассажиров по терминалу			+					
Стойки регистрации билетов и багажа				+				
Паспортный контроль					+			
Таможенный контроль					+			
Подача судна						+		
Проход по телетрапу / причалу и регистрация на судне						+		
Процессы, связанные с обслуживанием круизного лайнера							+	
Движение в акватории и по маршруту								+

По результатам моделирования и при получении значений из допустимых областей выполняется их проверка соответствия целевым функциям. В данном случае необходимо уделять

особое внимание обеспечению правильного описания оборудования и аналитических параметров лицом, принимающим решение, так как при неправильном выборе моделирование не приведет к желаемым результатам.

Предложенный путь решения является достаточно трудоемким и существует вероятность внесения ошибки в целевую функцию из-за человеческого фактора. Но при практической реализации структуры процессов в имитационной среде производится дополнительная проверка на логичность и связность. Таким образом, решение задачи синтеза структуры позволяет обоснованно выполнить изменения в работе служб морского пассажирского терминала для обеспечения требуемого уровня функционирования.

Обсуждение (Discussion)

В реальных процессах функционирования пассажирских терминалов всегда возникают сбои и задержки. Так как большинство процессов реализовано линейными структурами, то неминуемо любая задержка отразится на последующих этапах. Если сбой возникает системно, корректирующее воздействие направляется на соответствующий элемент системы. Но как быть, если необходимо наиболее точно спрогнозировать загруженность пассажирского терминала или определить, какое оборудование поставить, чтобы достичь быстроты в процессе обработки. Данную задачу можно решить, применяя, к примеру, опыт другого терминала партнера. Однако решение, вследствие наличия уникальных особенностей в каждом терминале, может не привести к желаемым результатам. С другой стороны, если лицо, принимающее решение, точно определяет целевые функции для своего терминала с учетом особенностей и четко вводит граничные условия, то оно уменьшает вероятность ошибки из-за потери данных или ошибочной переоценки некоторых функций. Практика показывает, как приведено в [1], [2], что решение задачи синтеза структуры позволяет на длительный период времени повысить качество процессов системы. Если не выполнять глубокое разбиение на все процессы, а представить решение в виде некоторой общей функции, как, к примеру, это можно реализовать системной динамикой, то точность моделирования будет сведена к минимуму. Поэтому правильным решением является построение набора целевых функций с последующей реализацией в имитационной модели с учетом особенностей каждого процесса.

Пример различных значений моделирования работы системы на основе представленной целевой функции пассажирского терминала приведен в табл. 3. Изменяемым параметром является время и параметры работы оборудования стоек регистрации и досмотра в терминале.

Таблица 3

Пример результатов моделирования

Изменяемый параметр	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11
Операционное время	10	15	17	20	21	22	23	24	30	…
Интенсивность на стойках регистрации / досмотра (оперативность работы оборудования стойки регистрации) — рабочее место, состоящее из принтера печати посадочных талонов и сканера паспортов	4	5	3,5	8	10	11,3	12,2	8,3	7	…
Операционное время	10	15	17	20	21	22	23	24	30	…
Интенсивность на стойках регистрации / досмотра (оперативность работы оборудования стойки регистрации) — рабочее место, состоящее из принтера печати посадочных талонов; сканера паспортов (другой производитель)	3	6	5,5	9	5	6	6,5	4	5	…

В результате моделирования получается набор данных, из которых лицо, принимающее решение, путем формирования области предпочтения, на основе граничных условий сформирует выборку допустимых данных. На основе эмпирических данных после выборки открывается возможность определения необходимых структурных изменений, направленных на обеспечение требуемого качества работы портовой системы.

Дополнительно необходимо отметить возможность адаптации целевой функции к условиям любого пассажирского терминала и наличие возможности включения новых функций.

Заключение (Conclusion)

Полученные целевые функции позволяют ставить и решать оптимизационную задачу синтеза структуры морского пассажирского терминала. Данная задача крайне важна для проведения исследования системы терминала в целом с учетом особенностей взаимодействия между элементами и решения задачи прогноза. На основе предложенной методики и практической реализации можно формировать обоснованный выбор наилучшей организации работы терминала. С научных позиций построение таких функций является важным результатом исследования. Синтез выполняется с целью обоснования множества элементов портовой структуры, отношений и связей между ними, характеристик элементов и связей, обеспечивающих в совокупности наилучшее функционирование и последующее проведение исследования путем моделирования. Однако полученные зависимости показывают, что при выполнении расчетов приведенные системы уравнений потребуют большей детализации и включения каждого функционала работы терминала с учетом граничных условий.

В результате проведенного исследования были получены следующие новые результаты:

– разработана система целевых функций для такого объекта транспортной инфраструктуры, как морской пассажирский терминал;

– представлена модель синтеза структуры морского пассажирского терминала;

– представлены ключевые показатели производительности пассажирского порта во взаимосвязи с переменными факторами;

– предложена и обоснована необходимость включения в целевые функции специальной функции, представляющей влияние внешней среды;

– обосновано формирование принятия решения на основе реализации задачи синтеза структуры и последующего моделирования для лиц, принимающих решение, по управлению морским пассажирским терминалом или задач модернизации инфраструктуры.

Включение функции, описывающей влияние внешней среды, позволяет при реализации в имитационной модели учитывать стохастический характер процессов и является одним из дальнейших направлений исследований в рассматриваемых условиях работы морских пассажирских терминалов. Модель строится на основе аналитической формы целевой функции, декомпозиции структуры терминала и обоснования условий реализации для каждого участка, а дальнейшее исследование, направленное на достижение наилучшего функционирования системы морского пассажирского терминала, целесообразно проводить, опираясь на методы имитационного моделирования и теории подобия систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — М.: Профессия, 2004. — 747 с.

2. *Beckman M. J.* Tinbergen lectures on organization theory / M. J. Beckman. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988. — 252 p.

3. Handbook of Terminal Planning / edited by J. W. Böse. — Springer Science+Business Media, LLC, 2011. — 456 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.

4. Marine transportation management / edited by Henry S. Marcus. — Taylor & Francis, 1987. — 247 p.

5. Постановление Правительства РФ от 19.08.2009 № 676 «О правилах обслуживания пассажиров и оказания иных услуг, обычно оказываемых в морском порту и не связанных с осуществлением пассажирами и другими гражданами предпринимательской деятельности».

6. Порт Санкт-Петербург Морской Фасад. Даты пиковых нагрузок [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.portspb.ru/Raspisanie (дата обращения: 15.02.2018).

7. *Сольницев Р. И.* Модели и методы принятия проектных решений / Р. И. Сольницев. — СПб.: ЛЭТИ, 2010. — 68 с.

8. *Майоров Н. Н.* Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.

9. Приказ Министерства транспорта РФ от 22.12.2009 № 247 «Об утверждении Типовой схемы организации пропуска через государственную границу Российской Федерации лиц, транспортных средств, грузов, товаров и животных в морских и речных (озерных) пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации».

10. *Dragovic B.* Simulation Modelling of Ship-Berth Link with Priority Service / B. Dragović, N. K. Park, Z. Radmilović, V. Maraš // Maritime Economics &Logistics. — 2005. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 316–335. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100141.

11. *Dragović B.* Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches / B. Dragović, N. K. Park, Z. Radmilović // Maritime Policy & Management. — 2006. — Vol. 33. — Is. 3. — Pp. 281–299. DOI: 10.1080/03088830600783277.

12. *Jugović A.* Organization of Maritime Passenger Ports / A. Jugović, V. Mezak, S. Lončar // Pomorski zbornik. — 2006. — Vol. 44. — Is. 1. — Pp. 93–104.

REFERENCES

1. Besekerskii, V.A., and E.P. Popov. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*. M.: Professiya, 2004.

2. Beckman, M.J. *Tinbergen lectures on organization theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.

3. Böse, J.W. *Handbook of Terminal Planning*. Springer Science+Business Media, LLC, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-8408-1.

4. Marcus, Henry S. *Marine transportation management*. Taylor & Francis, 1987.

5. Russian Federation. Government Decree № 676, 19.08.2009. O pravilakh obsluzhivaniya passazhirov i okazaniya inykh uslug, obychno okazyvaemykh v morskom portu i ne svyazannykh s osushchestvleniem passazhirami i drugimi grazhdanami predprinimatel'skoi deyatel'nosti.

6. Port Sankt-Peterburg Morskoi Fasad. Daty pikovykh nagruzok. Web. 15 Feb. 2018 <https://www.portspb.ru/Raspisanie>.

7. Sol'nitsev, R.I. *Modeli i metody prinyatiya proektnykh reshenii*. SPb: LETI, 2010.

8. Majorov, Nikolaj Nikolaevich, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Research of operational processes passenger services in the marine passenger terminal using simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.

9. Russian Federation. Decree of the Ministry of Transport № 247, 22.12.2009. "Ob utverzhdenii Tipovoi skhemy organizatsii propuska cherez gosudarstvennuyu granitsu Rossiiskoi Federatsii lits, transportnykh sredstv, gruzov, tovarov i zhivotnykh v morskikh i rechnykh (ozernykh) punktakh propuska cherez gosudarstvennuyu granitsu Rossiiskoi Federatsii".

10. Dragović, Branislav, N. K. Park, Z. Radmilović, and V. Maraš. "Simulation modelling of ship-berth link with priority service." *Maritime Economics & Logistics* 7.4 (2005): 316–335. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100141.

11. Dragović, B., N.K. Park, and Z. Radmilović. "Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches." *Maritime Policy & Management* 33.3 (2006): 281–299. DOI: 10.1080/03088830600783277.

12. Jugović, Alen, Vlado Mezak, and Slavko Lončar. "Organization of Maritime Passenger Ports." *Pomorski zbornik* 44.1 (2006): 93–104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Майоров Николай Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: *nmsoft@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Maiorov, Nikolaj N. —
PhD, associate professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg,
190000, Russian Federation
e-mail: *nmsoft@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.
Received: February 27, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-287-299

THE EXPERIENCE OF THE ORGANIZATION AND USE OF TECHNICAL MEANS FOR LIQUIDATION OF EMERGENCY OIL SPILL

V. I. Reshnyak

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

Provides an analysis of the state of the problem of environmental protection in case of oil spills or oil products spills as the main type of accidental pollution that may occur during the operation of vessels. The solution of the problem under investigation is characterized by the existence of certain experience, which is mainly expressed in the development of a set of technical means designed to localize and eliminate the spill. Analysis of this experience shows the need to continue to develop technical means, as well as organizational measures, generally aimed at protecting against such accidental pollution as an emergency spill of oil or oil products. Based on the theoretical provisions of the study of the problem of environmental protection from oil spills or oil products, it is proposed to distinguish two main areas of protection against accidental pollution: prevention of an accidental spill of oil or oil products and liquidation of a spill in the event of its occurrence. The indicated directions represent different complexes of organizational measures and technical means. It is shown that the solution of the problem of environmental protection from accidental pollution, including at the stage of liquidation of the accidental oil spill, is characterized by a technical aspect that reflects the level of development of technical means in the field of liquidation of emergency spills and organizational, which is determined by the effectiveness of using the mentioned technical means . The basis for analyzing the level of technology development and technologies for liquidation of an emergency spill is their classification, according to which three groups of technical equipment are proposed: to localize the spill of a spill, to eliminate it and to eliminate the consequences of an emergency spill. The main aspects of the organizational factor include the organization of operational localization and liquidation of an emergency spill and its consequences, the organization of selection of a complex of technical means, and the organization of liquidation of the consequences of an emergency spill by processing the resulting mixture of water and oil products. The organization of effective processing of a mixture of water and oil products requires the development and introduction of new technical means and technological methods.

Keywords: accidental pollution, accidental oil spill, the organization of liquidation of emergency spills, technical means for localization and elimination of accidental spills and their consequences.

For citation:
Reshnyak, Valerii I. "The experience of the organization and use of technical means for liquidation of emergency oil spill." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 287–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-287-299.

УДК 504.06

ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

В. И. Решняк

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

В статье приведен анализ состояния проблемы защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов как основного вида аварийного загрязнения, которое может иметь место при эксплуатации судов. Решение исследуемой проблемы характеризуется наличием определенного опыта, который в основном выражается в разработке комплекса технических средств, предназначенных для локализации и ликвидации разлива. Анализ этого опыта показывает необходимость продолжения разработки технических средств, а также организационных мероприятий, в целом направленных на защиту от такого аварийного загрязнения, как аварийный разлив нефти или нефтепродуктов. На основании теоретических положений при исследовании проблемы защиты окружающей среды от аварийных разливов

нефти или нефтепродуктов предложено выделить два основных направления защиты от аварийного загрязнения: предупреждение возникновения аварийного разлива нефти или нефтепродуктов и ликвидация разлива в случае его возникновения. Указанные направления представляют собой разные комплексы организационных мероприятий и технических средств. Показано, что решение проблемы защиты окружающей среды от аварийного загрязнения, в том числе на этапе ликвидации произошедшего аварийного разлива нефти, характеризуется техническим аспектом, который отражает уровень развития технических средств в области ликвидации аварийных разливов, и организационным аспектом, который определяет эффективностью использования указанных технических средств. В основу анализа уровня развития техники и технологий ликвидации аварийного разлива положена их классификация, в соответствии с которой предложены три группы технических средств: для локализации пятна разлива, для его ликвидации и для устранения последствий аварийного разлива. Показано, что в настоящее время развитие технических средств достигло приемлемого уровня и чаще всего лимитирующим фактором эффективной защиты от аварийного загрязнения является организационный фактор. К основным аспектам организационного фактора относятся: организация оперативной локализации и ликвидации аварийного разлива и его последствий, организация выбора комплекса технических средств, а также организация ликвидации последствий аварийного разлива путем переработки образующейся смеси воды и нефтепродуктов. Организация эффективной переработки смеси воды и нефтепродуктов требует разработки и внедрения новых технических средств и технологических приемов.

Ключевые слова: аварийное загрязнение, аварийный разлив нефти, организация ликвидации аварийных разливов, технические средства для локализации и ликвидации аварийных разливов и их последствий.

Для цитирования:
Решняк В. И. Опыт организации и использования технических средств для ликвидации аварийных разливов нефти / В. И. Решняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 287–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-287-299.

Введение (Introduction)

Проблема защиты окружающей среды при эксплуатации флота, как морского, так и на внутренних водных путях, в настоящее время остается актуальной, поскольку суда, как известно, являются источником загрязнения окружающей среды [1]. Это загрязнение может иметь разные причины и источники возникновения, а также может протекать по-разному и приводить к различным последствиям. Поэтому авторами работ [2], [3] предлагается различать *эксплуатационное* и *аварийное* загрязнения. В указанных ранее работах приведена характеристика этих видов загрязнения, проанализированы особенности их протекания и возможность регулирования. В настоящей статье внимание сосредоточено на проблемах аварийного загрязнения окружающей среды, которое может возникать при эксплуатации судов. Одним из наиболее часто встречающихся примеров аварийного загрязнения является аварийный разлив нефтепродуктов.

Проблема предотвращения загрязнения окружающей среды при эксплуатации техногенных объектов, в том числе судов, обеспечивается регулированием поступления загрязняющих веществ от этих объектов в окружающую среду. В целом, регулирование загрязнения окружающей среды, как и любого другого процесса, подразумевает следующее:

– установление параметров, объективно характеризующих регулируемый процесс;

– установление допустимых значений указанных параметров;

– обеспечение величины указанных параметров в пределах допустимых значений.

Сформированное в течение последнего десятилетия природоохранное законодательство определенным образом регулирует эксплуатационное загрязнение окружающей среды [4] – [6]. Например, уже установлены и законодательно закреплены параметры, которые отражают процесс загрязнения окружающей среды судовой сточной и нефтесодержащей льяльной (подсланевой) водой и установлены допустимые значения этих параметров. Созданы и применяются технические средства (ТС), с помощью которых обеспечиваются допустимые значения упомянутых параметров. В области предотвращения аварийного загрязнения при разливе нефтепродуктов регулирование ограничено установлением параметра, характеризующего данное загрязнение, но при этом данный параметр (риск) пока не закреплен законодательно.

Следует отметить, что к настоящему времени уже накоплен определенный опыт защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов [7] – [9], выражающийся в основном в разработке и применении определенного комплекса технических средств, обеспечивающих ликвидацию аварийных разливов. Однако использование этих технических средств на практике при ликвидации аварийных разливов нефти и их последствий не всегда дает ожидаемый положительный результат. Опыт изучения исследуемой проблемы показывает, что ее эффективное решение требует наряду с развитием теоретических основ [10], [11] создания новых технических и организационных предложений, которые смогут обеспечить более эффективное решение проблемы защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов [12], [13].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методология решения любой проблемы, в том числе исследуемой в настоящей работе, требует периодического ее переосмысления, анализа ее состояния на текущий момент времени, что позволяет разработать новые организационные и технические решения, которые обеспечат более эффективное решение рассматриваемой в настоящей работе проблемы. Собственный опыт подсказывает, что такая потребность в настоящее время существует.

Структурированность анализа проблемы защиты окружающей среды от аварийного загрязнения обеспечивается рядом теоретических положений, которые были сформулированы автором настоящей статьи в предыдущих его работах [2], [3], [7]. Одним из первых основополагающих теоретических положений служит утверждение о том, что защита окружающей среды от загрязнения при аварийном разливе нефти или нефтепродуктов является комплексом организационных мероприятий и технических средств, которые делятся на два направления:

– организационные мероприятий и ТС, направленные на предотвращение или снижение вероятности возникновения аварийного разлива;

– организационные мероприятия и ТС, направленные на ликвидацию аварийного разлива.

Настоящая статья посвящена второму направлению решения проблемы защиты окружающей среды на объектах водного транспорта при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов. Наличие технических средств, с одной стороны, и организация эффективного их использования, с другой — являются двумя одинаково важными сторонами решения проблемы защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов. Поэтому в процессе последующего анализа состояния исследуемой проблемы будет отражен как организационный, так и технический ее аспекты.

Еще одним теоретическим положением решения исследуемой проблемы является утверждение о том, что в целом комплекс организационных мероприятий должен быть направлен на решение следующих основных задач:

– обеспечение наличия технических средств, используемых при ликвидации аварийных разливов;

– обеспечение эффективного их использования.

Последующий анализ уже существующих и применяемых технических средств целесообразно будет основываться на их классификации, которая приведена в работах [2], [7]. Такая классификация позволяет объективно и систематизированно проанализировать состояние изучаемой проблемы. В соответствии с этой классификацией все ТС, которые могут быть использованы для ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН), должны быть разделены на следующие группы:

– ТС для локализации пятна разлива;

– ТС для ликвидации разлитой нефти с водной поверхности;

– ТС для ликвидации последствий аварийного разлива.

Такая классификация отражает логику организации действий по ликвидации аварийного разлива.

ТС для локализации разлива предназначены для предотвращения распространения нефти по водной поверхности моря или внутренних водных путей. Применение этой группы ТС имеет большое значение, так как позволяет при своевременной локализации пятна значительно уменьшить площадь загрязнения, а также исключить отрицательное влияние фактора времени. Надежно локализованное пятно разлива можно удалять с поверхности воды, уже не придавая решающего значения фактору времени.

Эффективность локализации разлива определяется следующими основными факторами:

– особенность конструкции технических средств для локализации разлива;

– организация их применения.

В настоящее время существует достаточно много конструкций ТС для локализации пятна аварийного разлива. Некоторые из них показаны на рис. 1 – 3.



Рис. 1. Применение боновых ограждений при локализации аварийного разлива [http://www.trancons.ru/services/larn/%D0%9B%D0%90%D0%A0%D0%9D.jpg]



Рис. 2. Боновые ограждения надувные [http://cn.lamor.com/wp-content/gallery/2012-lamor-auto-booms-lab/offshore-autoboom-480.jp]

Основными типами конструкции боновых ограждений являются надувные боновые ограждения и и ограждения постоянной плавучести. Первые обеспечивают оперативную доставку боновых ограждений к месту разлива и их быстрое приведение в рабочее состояние. Современные материалы и технологии позволили разработать конструкции боновых ограждений, которые занимают мало места при хранении на барабанах и быстро приводятся в рабочее состояние при подаче воздуха в отдельные секции ограждений, которые соединяются между собой, образуя цепь боновых ограждений требуемой длины.



Рис. 3. Боновые ограждения постоянной плавучести
[http://eco-ivteks.ru/files/001.jpg]

Современный выбор конструкций позволяет эффективно обеспечить локализацию аварийного разлива при различных условиях его протекания. Однако эффективное решение задачи локализации пятна разлива, как отмечалось ранее, во многом зависит еще от одного фактора — организации применения ТС локализации. Организация надежной и своевременной локализации разлива, в свою очередь, зависит от следующих факторов:

– особенности конструкции существующих ТС для локализации аварийных разливов;

– наличия достаточного количества боновых ограждений и средств его постановки;

– организации размещения (базирования) запаса боновых ограждений;

– организации оперативной доставки боновых ограждений к месту разлива.

Ограждения постоянной плавучести применяются в местах перегрузки нефти или нефтепродуктов как постоянно используемая конструкция.

Наличие достаточного количества боновых ограждений и средств для их постановки обеспечивается выполнением следующих действий:

– прогнозирование развития ситуации при аварийном разливе нефти или нефтепродуктов, например, на некотором участке водных путей или на акватории порта;

– правильное планирование оснащения рассматриваемого объекта боновыми ограждениями;

– обеспечение достаточного финансирования.

Обеспеченность боновыми ограждениями зависит от эффективности действия лиц и организаций, которые имеют то или иное отношение к ликвидации аварийного разлива.

Удаленность мест базирования боновых ограждений от места возможного аварийного разлива и возможность их оперативной доставки к месту разлива в большей степени является фактором объективным и не всегда зависит от содержания и качества действий участников ликвидации аварийного разлива, так как последний характеризуется пространственно-временной неопределенностью [2], [3]. Однако, в какой-то мере, эти трудности могут быть решены проведением соответствующих мероприятий организационного характера. Например, предусмотрев расположение так называемых *пунктов ЛАРН* [7] на участках водных путей, которые характеризуются наибольшей вероятностью аварийного разлива. К аналогичным мероприятиям можно отнести прогнозирование аварийных разливов и организацию использования так называемых *береговых защитных сооружений* [2]. Пример такого берегового защитного сооружения показан на рис. 4.

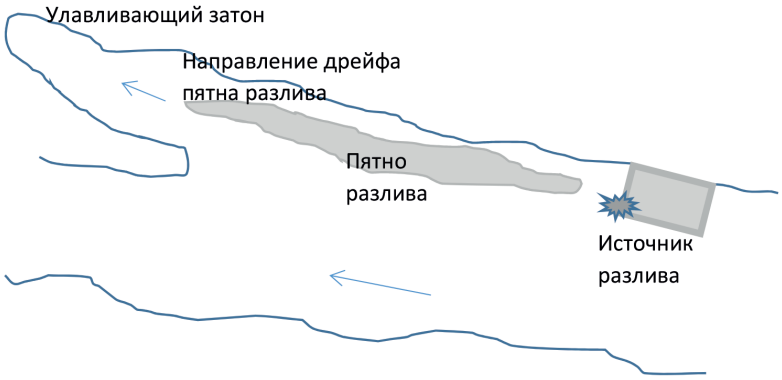


Рис. 4. Береговые защитные сооружения

Еще одной сложностью при обеспечении локализации пятна разлива является установка боновых ограждений и удержание их в нужной конфигурации. С этой проблемой почти всегда сталкиваются команды ликвидаторов аварийных разливов, особенно при разливах на водотоках (участках рек), когда течение не позволяет удерживать нужную конфигурацию цепи боновых ограждений. На рис. 5 показаны возможные изменения конфигурации цепи боновых ограждений при использовании одного бонопостановщика и фиксирования боновых ограждений с помощью якоря. Одним из решений данной проблемы является отработка схем постановки боновых ограждений — состава технических средств, способов фиксирования и др., а также тренировка и отработка согласованности действий участников установки боновых ограждений [14]. В целом, указанные обстоятельства являются «слабым звеном» в общей организации ликвидации аварийного разлива и его последствий и поэтому требуют разработки предложений, направленных на обеспечение эффективной локализации пятна разлива.

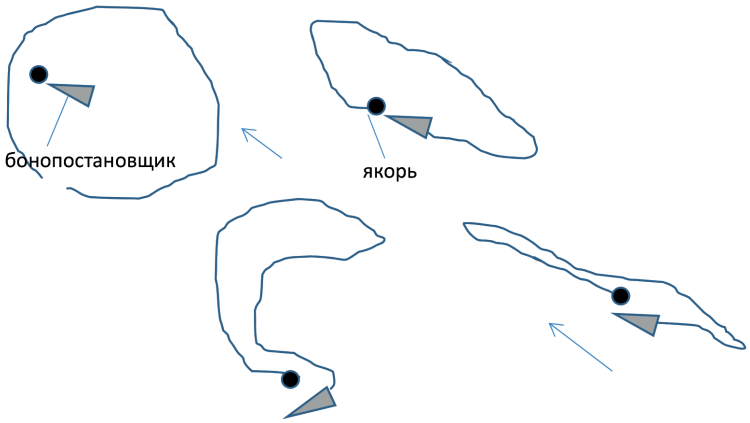


Рис. 5. Поведение боновых ограждений при их установке на течении

Мировая практика обладает некоторым опытом решения проблемы обеспечения локализации аварийных разливов, например, путем создания международных центров ликвидации аварийных разливов, высокий уровень оснащения которых, в том числе авиацией, в некоторых случаях обеспечивает оперативное реагирование на аварийные разливы нефти или нефтепродуктов. Однако в мире существует шесть-семь таких центров, которые в основном ориентированы на крупные аварийные разливы на море.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что эффективность локализации аварийного разлива в настоящее время определяется в основном организационным фактором и прежде всего, организацией своевременной доставки технических средств локализации, использованием береговых защитных сооружений, а также организацией отработки способов и действий постановки боновых ограждений.

Следующей стадией технологии ликвидации аварийного разлива и его последствий является удаление пятна разлива с водной поверхности. Эффективность этой операции зависит от следующих факторов:

– особенности конструкции существующих технических средств для ликвидации пятна разлива (ТС ЛАРН);

– уровня обеспеченности заинтересованных организаций комплексом технических средств для ликвидации пятна разлива;

– масштабов разлива и свойств разлитых нефтепродуктов;

– правильного применения ТС ЛАРН;

– организации работ по ликвидации аварийного разлива;

– организации оперативной доставки ТС ЛАРН к месту разлива.

В настоящее время уже существует достаточный выбор типов конструкции и способов удаления пятна разлива с поверхности воды. Все существующие и применяемые технические средства и технологии ликвидации пятна разлива должны быть разделены на следующие группы [7]:

– нефтесборные устройства порогового типа;

– нефтесборные устройства щеточного типа;

– адсорбционные технологии.

С точки зрения способа использования нефтесборные устройства могут быть следующих типов: переносные, стационарные, навесные.

Переносные нефтесборные устройства (рис. 6) представляют собой отдельные самостоятельно функционирующие устройства, т. е. не требующие использования плавсредств для их временного или постоянного размещения; их можно перемещать вручную или с помощью средств малой механизации.



Рис. 6. Переносное нефтесборное устройство
[http://portnews.ru/upload/baseimage/13462_originalimage_thumbs_mm-12-aq_1.jpg]

Стационарные нефтесборные устройства (рис. 7) нефтесборные устройства устанавливаются постоянно на плавсредстве, специально предназначенном для ликвидации пятна разлива. Чаще всего, такие нефтесборные устройства размещаются в носовой части плавсредства.



Рис. 7. Судно-нефтесборщик [http://ff1.mosfont.ru/photo/01/10/46/110469.jpg]

Навесные нефтесборные устройства (рис. 8) временно устанавливаются на плавсредства и используются в течение времени ликвидации пятна разлива. Такие нефтесборные устройства могут быть установлены как в носовой части, так и на борту плавсредства.



Рис. 8. Навесное нефтесборное устройство щеточного типа
[http://www.gazprom-neft.ru/img/sibneft/96/35.jpg]

Применение адсорбционных технологий требует наличия сорбента, а также устройств для обработки этим сорбентом пятна разлива и последующего удаления его с водной поверхности.

Выбор типа технических средств и технологий ликвидации аварийного разлива определяется свойствами разлитых нефтепродуктов, поэтому эффективность ликвидации пятна разлива зависит от правильности выбора типа технических средств и технологий. В работах [2], [7] приведены рекомендации такого выбора.

Задача организации работ по ликвидации аварийного разлива решается при прогнозировании аварийных разливов и разработке технологии его ликвидации. Последняя должна предусматривать выбор состава необходимых технических средств и разработку последовательности действий в случае возникновения разлива с учетом свойств разлитых нефтепродуктов, а также возможных масштабов разлива. Такая организационная работа должна быть выполнена заранее для наиболее опасных участков или районов водных путей.

Как отмечалось ранее, предотвращение загрязнения природной среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов предусматривает также действия, направленные на ликвидацию последствий аварийных разливов. К основным таким последствиям относятся:

– переработка смеси воды и нефтепродуктов, образующейся в результате ликвидации пятна разлива;

– утилизация сорбента;

– восстановление береговых территорий.

Необходимость решения указанных задач зависит от обстоятельств разлива нефти, а также способов и технических средств, используемых при ликвидации пятна разлива. Однако задача переработки образующейся смеси воды и нефти или нефтепродуктов будет иметь место всегда. Эффективность ее решения определяется следующими факторами:

– наличием технических средств для переработки такой смеси;

– возможностью их эффективного применения.

Анализ существующих в настоящее время технических средств, применяемых для предотвращения загрязнения природной среды от загрязнения при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов, показывает отсутствие подобных технических средств, а также теоретической проработки вопросов переработки образующейся смеси воды и нефти или нефтепродуктов. Решение задачи переработки смеси воды и нефтепродуктов является важной составляющей всех действий, направленных на предотвращение загрязнения водных объектов при аварийных разливах нефти

или нефтепродуктов, так как при определенных обстоятельствах может оказаться лимитирующей стадией всего процесса ликвидации аварийного разлива. Другими словами, эта стадия может определять эффективность всех действий по ликвидации аварийного разлива.

Решение задачи переработки смеси воды и нефтепродуктов начинается с формирования комплекса технических средств, который определяется содержанием процессов, которые должны происходить в этих технических средствах. Содержание процессов определяется свойствами смеси и требованиями к качеству ее переработки. В зависимости от типа используемых средств для сбора нефти с поверхности воды извлекаемая смесь может быть двух основных видов: обводненные нефтепродукты или нефтесодержащая вода. Смесь первого вида образуется при использовании щеточных нефтесборных устройств, смесь второго типа — при использовании пороговых нефтесборных устройств. Соответственно переработка первого вида смеси представляет собой процессы отделения воды от обводненных нефтепродуктов, второго — процессы очистки нефтесодержащей воды.

Существует определенный опыт в области технологии и технических средств для очистки нефтесодержащей воды, в том числе и при эксплуатации судов. Однако эффективность решения проблемы переработки смеси воды и нефтепродуктов зависит не только от эффективности работы устройств для очистки нефтесодержащей воды от нефтепродуктов, но и от организации решения такой задачи. В настоящее время более существенное значение имеет фактор организации переработки смеси.

В целом очистка образующейся при ликвидации пятна разлива смеси воды и нефтепродуктов может выполняться основными способами, которые определяются местом расположения очистного оборудования и его типом. Первый способ предполагает расположение очистного комплекса вдали от места разлива и транспортировку образующейся смеси от места разлива к очистному оборудованию (рис. 9, *а*).

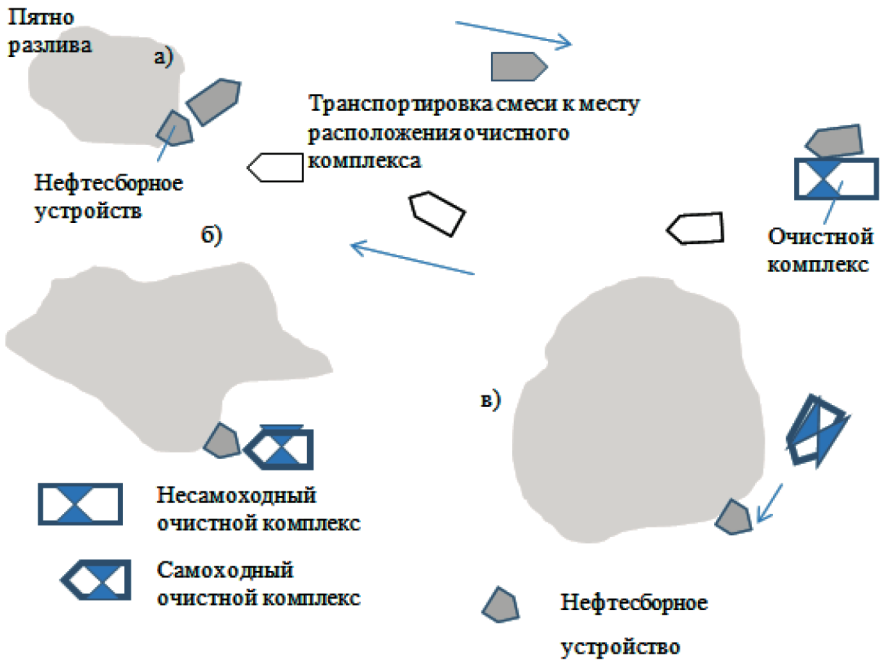


Рис. 9. Варианты организации очистки смеси воды и нефтепродуктов:
а — с транспортировкой смеси воды и нефти; *б* — с применением НПОК; *в* — с применением СПОК

Данный комплекс может представлять собой несамоходное плавсредство или береговое сооружение. Доставка смеси воды и нефтепродуктов от места разлива до очистного комплекса обеспечивается с помощью судов. В качестве таких судов могут применяться суда-сборщики судовых загрязнений, танкеры и специализированные суда. Этот вариант организации переработки смеси

требует наибольшего количества технических средств и может характеризоваться значительными потерями времени на транспортировку смеси. В экономическом отношении данный вариант является наиболее затратным.

Второй способ предполагает применение очистного комплекса, который расположен в непосредственной близи от пятна разлива (см. рис. 9, *б* и *в*), и не требует организации транспортировки образующейся смеси, что является весьма выигрышным обстоятельством по сравнению с первым. В обоих случаях лимитирующим фактором будет являться обеспечение оперативной доставки очистного комплекса к месту разлива. Однако при своевременной постановке боновых ограждений или использовании так называемых *береговых защитных сооружений* актуальность этого фактора становится не такой острой. При организации очистки смеси могут быть использованы как несамоходные плавучие очистные комплексы (НПОК), так и самоходные плавучие очистные комплексы (СПОК). Последние, в свою очередь, могут представлять собой специализированные суда, стационарно оснащенные очистным оборудованием, а также суда с временно устанавливаемым при возникновении такой необходимости оборудованием для очистки нефтесодержащей воды. В качестве плавучих очистных комплексов могут быть использованы не только средства, специально предназначенные для данных целей, но и плавучие очистные станции для сбора и очистки нефтесодержащей подсланевой воды. На водном транспорте уже существует опыт создания и использования таких плавучих очистных комплексов, который, однако, должен быть расширен.

Обсуждение (Discussion)

Результаты анализа организационной и технической стороны защиты от аварийных разливов нефти или нефтепродуктов позволяют оценить состояние проблемы в настоящее время. Достаточное наличие технических средств, с одной стороны, и организация эффективного их использования, с другой — являются двумя одинаково важными сторонами решения проблемы защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов.

Обеспечение наличия комплекса технических средств ЛАРН для каждого потенциально опасного объекта (судна, бункербазы, нефтяного порта или терминала) включает в себя обоснование выбора состава такого комплекса и собственно обеспечение наличия. Обоснование выбора состава базируется на прогнозировании возможного разлива и последующего развития событий. При этом учитываются физические свойства нефти или нефтепродуктов, а также возможные масштабы разлива. Обеспечение наличия ТС ЛАРН в целом подразумевает обеспечение возможности применения этих средств при возникновении аварийного разлива. Ранее изложенное не определяет строгую необходимость владения теми или иными организациями указанных ранее технических средств, однако подразумевает возможность использования ТС ЛАРН. Последнее относится к организационной стороне обеспечения готовности к ликвидации аварийного разлива.

Составление планов ЛАРН также относится к организационной стороне защиты окружающей среды при аварийных разливах нефти или нефтепродуктов [15]. План ЛАРН позволяет значительно повысить эффективность решения исследуемой проблемы.

Обеспечение эффективного использования технических средств ЛАРН является одним из обязательных условий организации ликвидации ЛАРН. Возможность применения ТС ЛАРН еще не означает решение задачи предотвращения загрязнения окружающей среды при аварийном разливе нефти. Одним из основных аспектов обеспечения эффективного использования ТС ЛАРН является возможность оперативного реагирования на аварийный разлив. Прежде всего, это обеспечение оперативной локализации пятна разлива. Задачи обеспечения оперативного реагирования решаются, как правило, для каждой потенциально опасной ситуации, хотя некоторые общие рекомендации были приведены в настоящей статье и других работах автора [11], [14]. В значительной степени эффективность операции локализации определяется организационными решениями. Поэтому представляется целесообразным разработать расширенный ряд таких типовых

организационных предложений, из которых можно выбирать наиболее эффективные для условий ликвидации разлива.

Эффективность последующей ликвидации пятна разлива определяется правильным выбором способа и технических средств для сбора разлитой нефти, а также возможностью переработки образующейся при ликвидации разлива смеси воды и нефтепродуктов или сорбента. Особенно актуальной данная часть общей технологии ликвидации аварийного разлива является при использовании пороговых нефтесборных устройств, когда образуется большое количество нефтесодержащей воды. Применение технических средств для очистки такой нефтесодержащей воды может осуществляться разными способами, однако представляется, что наиболее целесообразным является применение упомянутых технических средств при их размещении на время ликвидации аварийного разлива непосредственно вблизи района действия нефтесборных устройств. Реализация такого предложения требует разработки технических средств для переработки (очистки) смеси воды и нефтепродуктов. Такими техническими средствами могут быть как несамоходные, так и самоходные плавсредства. При этом последние могут одновременно выполнять функции бонопостановщика.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, проведенные исследования проблемы предотвращения загрязнения окружающей среды от аварийного загрязнения показывают следующее. Решение указанной проблемы характеризуется технической и организационной стороной. Другими словами, предотвращение загрязнения окружающей среды при аварийном разливе нефти как одного из наиболее распространенных случаев аварийного загрязнения на водном транспорте представляет собой комплекс технических средств и организационных мероприятий. Эффективность решения исследуемой проблемы определяется формированием теоретических основ предотвращения аварийного загрязнения, наличием необходимых технических средств, а также организацией их эффективного использования. Теоретические основы предполагают формирование двух основных направлений предотвращения аварийного загрязнения: превентивной и активной защиты, а также классификацию технических средств, используемых при ликвидации аварийного разлива, и разработку рекомендаций по их применению, которые представляют собой комплекс типовых организационных предложений. В настоящее время существует определенный опыт ликвидации аварийных разливов нефти. Однако существующий комплекс технических средств требует его расширения, которое относится, прежде всего, к разработке комплекса технических средств для переработки смеси воды и нефтепродуктов, образующейся в процессе ликвидации пятна разлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Решняк В. И.* Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2011. — 207 с.

2. *Решняк В. И.* Система управления экологической безопасности при эксплуатации судов на внутренних водных путях: монография / В. И. Решняк. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 147 с.

3. *Решняк В. И.* Управление экологической безопасностью при эксплуатации судов на внутренних водных путях / В. И. Решняк, К. В. Решняк // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 1 (82). — С. 106–109.

4. Правила Речного Регистра: в 4 т. — М.: Речной регистр, 2008. — Т. 4. — 1430 с.

5. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года и Протокол 1978 года. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. — 760 с.

6. Наставление по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов. — М., 2009. — 47 с.

7. *Решняк В. И.* Экологическая безопасность при перегрузке нефти и нефтепродуктов в портах / В. И. Решняк. — СПб.: СПбГУВК, 2007. — 237 с.

8. *Альхименко А. И.* Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними / А. И. Альхименко. — СПб.: ОМПресс, 2005.— 237 с.

9. *Курников А. С.* Концепция повышения экологической безопасности судна / А. С. Курников. — Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2002. — 80 с.

10. *Наумов В. С.* Предотвращение загрязнения окружающей среды на внутреннем водном транспорте управлением антропогенной нагрузкой: дис. … д-ра техн. наук / В. С. Наумов. — Н. Новгород, 2003. — 321 с.

11. *Пластинин А. Е.* Научные основы прогнозирования и анализа экологических последствий разливов нефти на внутренних водных путях: дис. … д-ра техн. наук / А. Е. Пластинин. — Н. Новгород, 2016. — 284 с.

12. *Li Y.* The risk probability analisis of oil spill on offshore facilities based on ETA / Y. Li, C. Tang, X. Wang, P. Xu // Advanced Materials Research. — Trans Tech Publications, 2014. — Vol. 864–867. — Pp. 809–814. DOI: 10.4028/www.scientific.net / AMR.864– 867.809.

13. *Fingas M.* Oil spills and response / M. Fingas // Springer handbook of Ocean Engeeniring; M. R. Dhanak, N. I. Xiros, [eds]. — 2016. — Pp. 1067–1093.

14. Руководство ликвидации разливов нефти на морях, озерах и реках. — СПб.: Морсар, 2002. — 44 с.

15. Положение о разработке планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах. Утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 26 августа 2013 г. № 730.

REFERENCES

1. Reshnyak, V. I. *Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchei podslanevoi vodoi pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok*. SPb.: SPbGUVK, 2011.

2. Reshnyak, V. I. *Sistema upravleniya ekologicheskoi bezopasnosti pri ekspluatatsii sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

3. Reshnyak, V.I., and K.V. Reshnyak. "Management of environmental safety the operation vessels on inland waterways." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(82) (2017): 106–109.

4. Pravila Rechnogo Registra: v 4 t. Vol. 4. M.: Rechnoi registr, 2008.

5. *Mezhdunarodnaya konventsiya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov 1973 goda i Protokol 1978 goda*. SPb.: Izd– vo ZAO «TsNIIMF», 2008.

6. *Nastavlenie po predotvrashcheniyu zagryazneniya vnutrennikh vodnykh putei pri ekspluatatsii sudov*. M., 2009.

7. Reshnyak, V.I. *Ekologicheskaya bezopasnost' pri peregruzke nefti i nefteproduktov v portakh*. SPb.: SPbGUVK, 2007.

8. Al'khimenko, A. I. *Avariinye razlivy nefti v more i bor'ba s nimi*. SPb.: OMPress, 2005.

9. Kurnikov, A. S. *Kontseptsiya povysheniya ekologicheskoi bezopasnosti sudna*. N. Novgorod: Izd-vo VGAVT, 2002.

10. Naumov, V.S. Predotvrashchenie zagryazneniya okruzhayushchei sredy na vnutrennem vodnom transporte upravleniem antropogennoi nagruzkoi. Dr. Diss. Nizhnii Novgorod, 2003.

11. Plastinin, A.E. Nauchnye osnovy prognozirovaniya i analiza ekologicheskikh posledstvii razlivov nefti na vnutrennikh vodnykh putyakh. Dr. Diss. Nizhnii Novgorod, 2016.

12. Li, Yun Bin, C. Tang, X. Wang, and P. Xu. "The Risk Probability Analysis of Oil Spill on Offshore Facilities Based on ETA." *Advanced Materials Research*. Vol. 864–867. Trans Tech Publications, 2014. 809–814. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.864– 867.809.

13. Fingas, M. "Oil spills and response." *Springer handbook of Ocean Engeeniring*. Edited by M. R. Dhanak, N. I. Xiros. 2016. 1067–1093.

14. *Rukovodstvo likvidatsii razlivov nefti na moryakh, ozerakh i rekakh*. SPb.: Morsar, 2002.

15. Polozhenie o razrabotke planov meropriyatii po lokalizatsii i likvidatsii posledstvii avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh. Utverzhdeno postanovleniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 26 avgusta 2013 g. N 730.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Решняк Валерий Иванович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *RV53@mail.ru, ReshnyakVI@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Reshnyak, Valerii I. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *RV53@mail.ru, ReshnyakVI@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308

ANALYSIS OF SPEED REGIME LNG-TANKERS IN THE NORTHERN SEA ROUTE IN PERIOD OF WINTER NAVIGATION 2017-18

E. O. Ol'khovik

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

The issues of using the geographical information system of the Northern sea route to monitor the movement of tankers intended for the transportation of liquid natural gas in waters of Arctic seas are considered. The examples confirming of begin the actual realization of the Complex project plan about development of Northern sea route are given. Particular attention is paid to the description of marine Arctic transport projects for the transportation of hydrocarbons by large-tonnage tankers and gas tankers. The list of the most significant transitions that were performed in the water area of the Northern sea route by large-tonnage tankers from winter 2017 to 2018 is given. Based on the above list of implemented transport projects and analysis of the prospects for commercial use of the Northern sea route, a list of trends in the use of large-tonnage tankers in the waters of the Arctic seas has been formed. It is noted that the presented work is a continuation of the research on the development and use of geographical information systems for the analysis of the parameters of the movement of ships in the waters of the Northern sea route and the characteristics of marine Arctic transport flows in General in different navigation periods, in which the author was directly involved since 2016. An analytical review of scientific publications on the use of geographical information systems in the regulation of the movement of tankers, which were used for the export of hydrocarbons from offshore fields in the Gulf of Mexico, is presented. A comparative evaluation of the criteria used in the regulation of the movement of ships in the non-freezing seas and in the waters of the Northern sea route is carried out. The necessity of collecting and analyzing the actual data on the characteristics of the movement of large-tonnage tankers used for the transportation of liquefied natural gas in the waters of the Northern sea route in an experimental mode and during the first regular passage is substantiated. The paper presents the actual data and their analysis about speed regimes of five Yamalmax class tankers while performing their independent navigation in the waters of the Northern sea route in the period from November 2017 to March 2018. The direction of further use of the received data is defined.

Keywords: Northern sea route, speed modes, monitoring, geographic information system, large-capacity tankers, track, Yamalmax.

For citation:
Ol'khovik, Evgeniy O. "Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

УДК 528.47

АНАЛИЗ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ СПГ-ТАНКЕРОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В ПЕРИОД ЗИМНЕЙ НАВИГАЦИИ 2017 – 2018 ГГ.

Е. О. Ольховик

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

Рассмотрены вопросы использования географической информационной системы Северного морского пути для мониторинга движения танкеров, предназначенных для транспортировки сжиженного природного газа в акватории арктических морей. Приведены примеры, подтверждающие начало фактической реализации документа «Комплексный проект плана развития Северного морского пути». Особое внимание уделяется описанию морских арктических транспортных проектов по транспортировке углеводородного сырья крупнотоннажными танкерами и танкерами-газовозами. Приведен перечень наибо-

лее значимых переходов, которые были выполнены в акватории Северного морского пути крупнотоннажными танкерами в зимний период с 2017 по 2018 гг. На основании приведенного перечня реализованных транспортных проектов и анализа перспектив коммерческого использования Северного морского пути выявлена тенденция круглогодичного использования крупнотоннажных танкеров в акватории арктических морей. Представленная работа является продолжением исследований, посвященных разработке и использованию географических информационных систем, для анализа параметров движения морских судов в акватории Северного морского пути и характеристик морских арктических транспортных потоков в целом в разные навигационные периоды, в которых автор принимал непосредственное участие, начиная с 2016 г. Приводится аналитический обзор научных публикаций, посвященных использованию географических информационных систем при регулировании движения танкеров, с целью вывоза углеводородов с шельфовых месторождений Мексиканского залива. Выполнена сравнительная оценка критериев, применяемых при регулировании движения морских судов в незамерзающих морях и в акватории Северного морского пути. Обосновывается необходимость сбора и анализа фактических данных о характеристиках движения крупнотоннажных танкеров, используемых для перевозки сжиженного природного газа в акватории Северного морского пути в экспериментальном режиме и при выполнении первых регулярных штатных рейсов. Приведены фактические данные и анализ скоростных режимов пяти однотипных танкеров класса Yamalmax при выполнении ими самостоятельного плавания в акватории Северного морского пути в период с ноября 2017 г. по март 2018 г. Определено направление дальнейшего использования полученных данных.

Ключевые слова: Северный морской путь, скоростные режимы, мониторинг, географическая информационная система, крупнотоннажные танкеры, линии пути, СПГ-танкер.

Для цитирования:
Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017 – 2018 гг. / Е. О. Ольховик// Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

Введение (Introduction)

В настоящее время в Арктике, в соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации [1] и Комплексным проектом плана развития Северного морского пути [2], [3], активно реализуются проекты транспортировки углеводородного сырья крупнотоннажными нефтяными танкерами и танкерами-газовозами. В данный момент запущены проекты «Ямал СПГ» и «Новый порт», а их перечень будет пополняться в ближайшие годы новыми проектами: «Арктик СПГ-2», «ВостокУголь».

В летнюю навигацию 2010 г. танкер «СКФ Балтика», имеющий типоразмер Aframax и ледовый класс Arc5, совершил экспериментальный рейс по маршруту Мурманск – Нингбо (Китай). Общая продолжительность перехода составила 22 дня, из которых около восьми суток судно находилось в акватории Северного морского пути (СМП).

В 2011 г. танкер «Владимир Тихонов», имеющий типоразмер Suezmax и ледовый класс Arc4, прошел СМП за семь суток, следуя из Мурманска в порт Маптапхут (Тайланд). В марте 2017 г. танкер-газовоз «Кристоф де Маржери», имеющий типоразмер Yamalmax и ледовый класс Arc7, совершил тестовый проход по подходному каналу к порту Сабетта. В летнюю навигацию газовоз совершил первый коммерческий рейс с партией сжиженного природного газа (СПГ) из Норвегии в Южную Корею, преодолев СМП за шесть с половиной суток. По данным Администрации СМП (АСМП) [4], в 2017 г. был зафиксирован положительный результат по грузоперевозкам, объем которых достиг почти 10 млн т.

В акватории СМП в течение последних нескольких лет отмечается следующее:

– увеличение общего числа нефтяных танкеров и танкеров-газовозов;

– увеличение доли танкеров, имеющих большую осадку;

– увеличение доли транспортных судов, имеющих высокий ледовый класс;

– переход арктических портов Обской Губы из тестового режима эксплуатации в режим штатной работы;

– увеличение продолжительности навигации.

Данная работа является продолжением исследований [5] – [9], посвященных использованию геоинформационных систем (ГИС) для анализа параметров движения морских судов в акватории СМП и характеристик арктического морского транспортного потока в целом в разные навигационные периоды.

Использование ГИС для исследования параметров морских транспортных потоков применялось при регулировании движения основных групп судов, состоящих из 30 – 50 танкеров класса Aframax и Suezmax, при освоении шельфовых месторождений в Мексиканском заливе [10]. В качестве главных опасностей рассматривались аварии, связанные с возможными столкновениями танкеров.

В отличие от Мексиканского залива и большинства других акваторий Мирового океана, при регулировании движения крупнотоннажных судов в акватории СМП наряду с возможными столкновениями танкеров, опасность представляют навалы танкеров на ледоколы, а также аварии, связанные со столкновением судна со льдом, ледовым сжатием, касанием грунта или посадкой на мель. Исследованию влияния навигационно-гидрографических, гидрометеорологических и ледовых условий на безопасность мореплавания в акватории СМП посвящено значительное количество работ [11] – [14]. При этом, как правило, рассматривается воздействие негативных факторов на одиночное судно, а не на поток судов. В работе [15] предпринята попытка учесть совместное влияние льда и мелководья на морской транспортный поток.

Целью настоящей работы является сбор и анализ фактических данных о характеристиках движения танкеров, предназначенных для перевозки СПГ в акватории СМП, в период с декабря 2017 г. по март 2018 г. Объектом исследования являются маршруты и скоростные режимы СПГ-танкеров.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Мониторинг движения судов в акватории СМП обеспечивается средствами спутниковой автоматизированной идентификационной системы (АИС) и ежедневными сообщения с судов о своем местоположении, регламент которых установлен «Правилами плавания в акватории СМП» [4, п. 20]. Данные мониторинга используются для контроля за соблюдением района и времени нахождения в акватории каждого судна в соответствии с разрешением, полученным капитаном судна перед входом в акваторию СМП. Из всех судов, работающих в акватории СМП в период с ноября 2017 г. по январь 2018 г., было отобрано пять однотипных танкеров, предназначенных для перевозки СПГ: «Борис Вилькицкий» (Boris Vilkitsky, IMO 9768368), «Кристоф де Маржери» (CChristophe de Margerie, IMO 9737187), «Эдуард Толь» (Eduard Toll, IMO 9750696), «Федор Литке» (Fedor Litke, IMO 9768370) и «Владимир Русанов» (Vladimir Rusanov, IMO 9750701). Танкер «Владимир Русанов» проходил в отмеченный период ходовые испытания, поэтому данные о его движении использовались лишь частично.

Танкеры имеют следующие характеристики: длина — 299 м, ширина — 50 м, максимальная осадка — около 12 м, максимальная скорость — 19,5 уз, дедвейт — 100 тыс. т. Ледовый класс Arc7 позволяет судам такого типа выполнять самостоятельное плавание во льдах толщиной до 2,1 м без ледокольной проводки.

Маршруты движения танкеров наносились на электронную морскую карту по поступающей информации с них информации, которая содержала следующие данные: время, географические координаты, скорость и курс судна на момент передачи информации. Период обновления данных в среднем составил 1 ч, общее количество записей о маршруте движения каждого судна составил около 500 записей.

Полученные данные использовались для оценки и сравнения скоростного режима движения судов на отдельных участках акватории СМП.

Результаты (Results)

На рис. 1 цветными пунктирными линиями отмечены пути движения СПГ-танкеров: «Борис Вилькицкий», «Эдуард Толь» и «Федор Литке», совершивших самостоятельно транзитное плавание в акватории СМП в период с декабря 2017 по январь 2018 г.

Танкер «Борис Вилькицкий» пересек 180 меридиан 14.11.2017, транзитом прошел весь СМП за 12 сут и вышел через пролив Карские Ворота 24.11.2017.

Танкер «Эдуард Толь» пересек 180 меридиан 26.12.2017, прибыл на рейд порта Сабетта 14.01.2018, покинул его 17.01.2018 и вышел из акватории СМП через пролив Карские Ворота 19.01.2018. Общее время перехода составило 24 дня, из них восемь дней танкер находился в заливе Обская Губа.

Танкер «Федор Литке» пересек 180 меридиан 10.12.2017, подошел к заливу Обская Губа 22.12.2017, прибыл на рейд порта Сабетта 24.12.2017, покинул порт 28.12.2017, вышел из акватории СМП через пролив Карские Ворота 31.12.2017. Общее время перехода составило 21 день, из них шесть дней находился в заливе Обская Губа.

Все танкеры двигались до п. Сабетта без груза с осадкой 10,3 – 11 м. Обращает на себя внимание тот факт, что в восточном секторе СМП путь танкера «Борис Вилькицкий» прошел севернее Новосибирских островов, тогда как маршрут двух других танкеров проходил через пролив Санникова. На остальных участках пути танкеров отклонялись друг от друга незначительно.

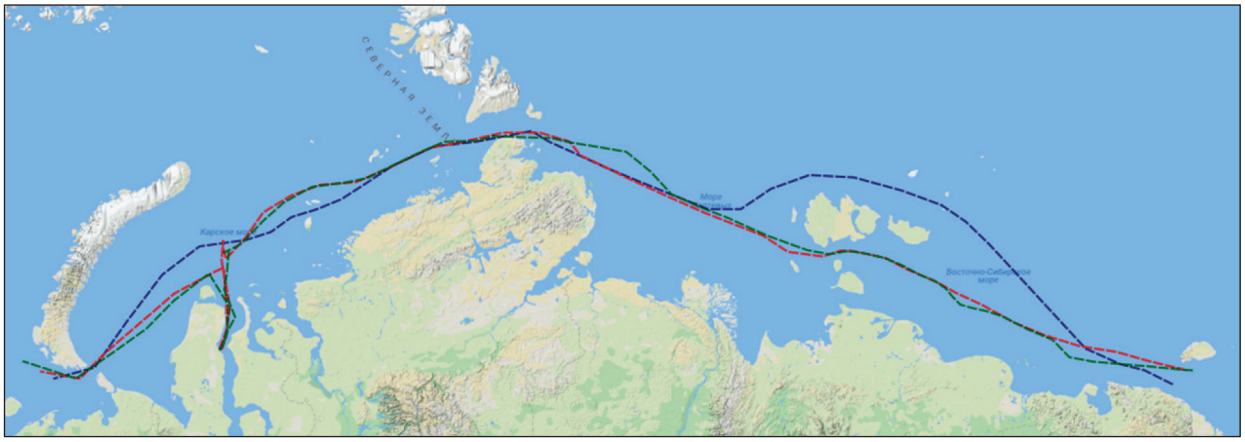


Рис. 1. Маршруты СПГ-танкеров в период ноябрь 2017 г. – январь 2018 г.:

------- — «Борис Вилькицкий»;

------- — «Эдуард Толь»;

------- — «Федор Литке»

На рис. 2 стрелками показано направление движения судов. Цвет стрелок обозначает градуированный интервал скоростей в соответствии с палитрой обозначений, приведенной в правом верхнем углу рисунка. В нижней части рисунка пунктирной линией показано генеральное направление движения судов. В прямоугольниках приведены средние значения скорости, которые имели танкеры на соответствующих участках пути.

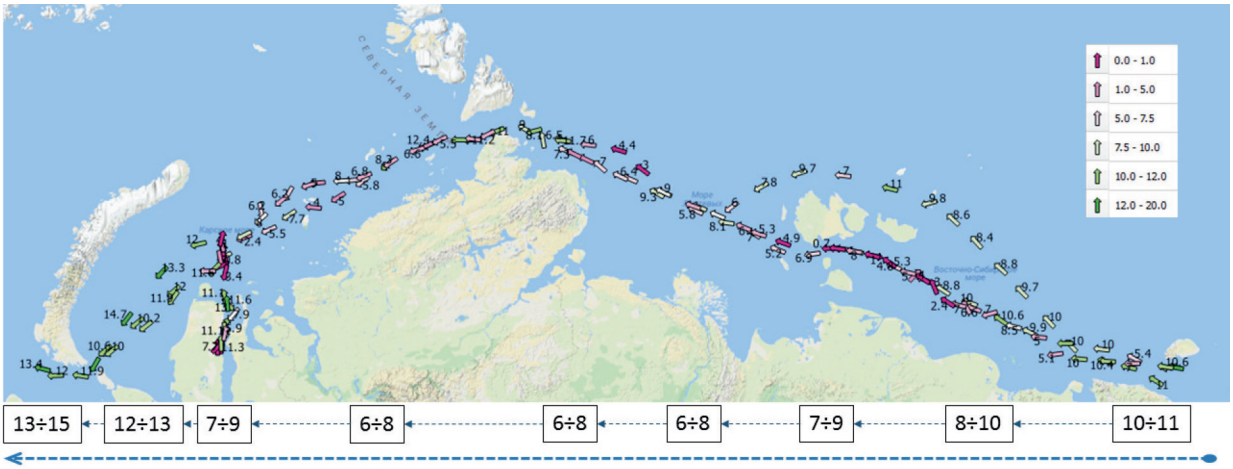


Рис. 2. Скорость СПГ-танкеров в акватории СМП

Наибольшая скорость танкеров в акватории СМП составляла до 15,5 уз, при входе и выходе из акватории СМП скорость — до 17,5 уз на чистой воде, при максимальной заявленной скорости по паспорту в 19,5 уз. Скорость в Чукотском море до пролива Лонга составляла от 11 уз до 12,5 уз. Скорость в Восточно-Сибирском море была уменьшена до 8 – 10 уз. В проливе Санникова средняя скорость танкеров «Фёдор Литке» и «Эдуард Толь» уменьшилась до 4 – 6 уз. В отдельных точках скорость судов падала до нуля. Танкер «Борис Вилькицкий» прошел севернее Новосибирских островов со средней скоростью в 8 – 10 уз. В море Лаптевых, в проливе Вилькицкого и в восточной части Карского моря суда шли со средней скоростью 6 – 8 уз. При подходе к заливу Обская Губа скорость была снижена до 2 – 3 уз. Далее танкер «Борис Вилькицкий» проследовал к проливу Карские Ворота со скоростью в 12 – 14 уз.

Танкеры «Фёдор Литке» и «Эдуард Толь» после захода в порт Сабетта с грузом СПГ направились в сторону пролива Карские Ворота. Средняя скорость судов с грузом на участке маршрута от залива Обская Губа до пролива Карские Ворота была на 2–3 уз меньше, чем скорость танкера «Борис Вилькицкий», прошедшего этот же путь в балласте.

На рис. 3 цветными пунктирными линиями отмечены пути следующих СПГ-танкеров: «Борис Вилькицкий» (синяя пунктирная линия), «Эдуард Толь» (зеленая пунктирная линия), «Федор Литке» (красная пунктирная линия) и «Кристоф де Маржери» (желтая пунктирная линия), совершивших самостоятельно плавание в феврале – марте 2018 г. из Баренцева моря через пролив Карские Ворота до порта Сабетта, расположенного на левом берегу залива Обская Губа, и обратно.

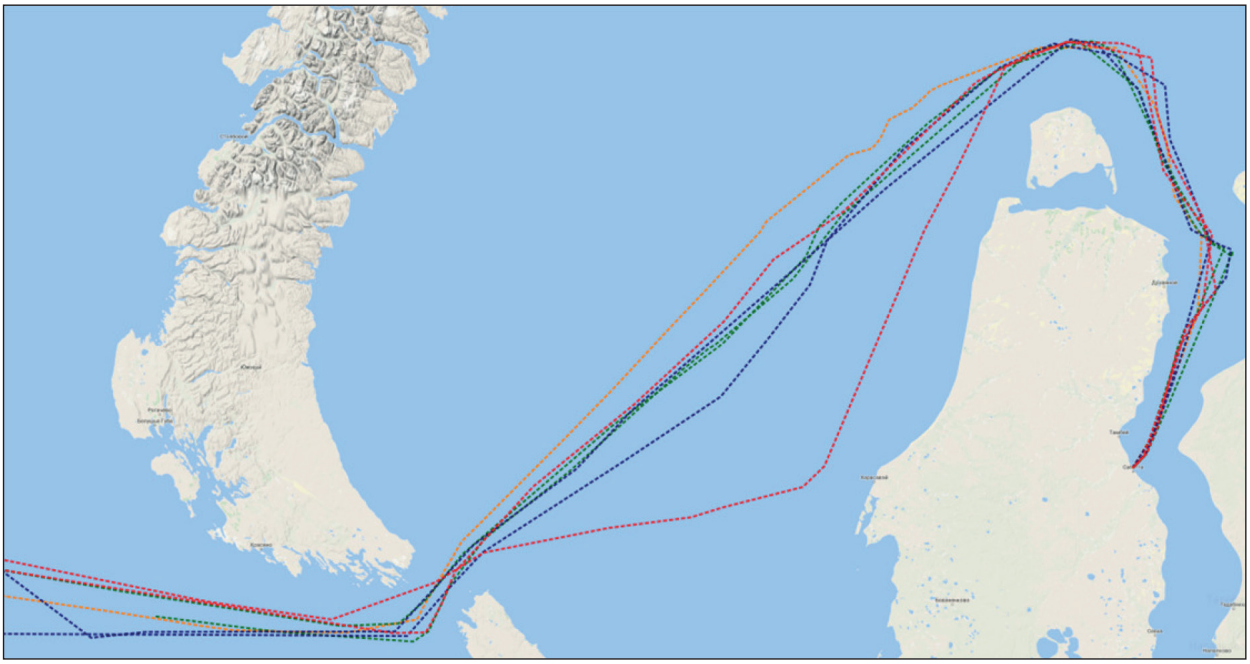


Рис. 3. Линии пути танкеров на участке маршрута Карские Ворота – Обская Губа (п. Сабетта) (февраль – март 2018 г.):

------- — «Борис Вилькицкий»;

------- — «Эдуард Толь»;

------- — «Федор Литке»;

------- — «Кристоф де Маржери»

В порт Сабетта танкеры шли без груза, имея осадку 10,3 – 11 м. На обратном пути, с грузом, они имели осадку 12 м. Средняя скорость на переходе Баренцево море – пролив Карские Ворота в обоих направлениях практически не зависела от наличия груза: скорость в балласте — 13,5 уз, с грузом — 13,2 уз.

Движение в Карском и Баренцевом морях каждый танкер выполнял по собственному маршруту. Параметры движения танкеров на маршруте Баренцево море – Обская Губа (п. Сабетта) иллюстрируются схемой, показанной на рис. 4. Направление движения судов показано стрелками, скорость соответствует цветовой палитре, которая была использована на рис. 2. В заливе Обская Губа на подходах к порту Сабетта средняя скорость танкеров составляла 9 уз. Пути движения всех судов на этом участке сливаются практически в одну линию. На выходе из Обской Губы скорость судов увеличивалась до 10 – 11 уз. Линии пути всех танкеров слегка расходятся. В точке, расположенной к северу от полуострова Ямал, все пути сходятся в одну точку. На переходе от Обской Губы до пролива Карские Ворота скорость судов менялась от 6,9 до 16 уз. Максимальную скорость, равную 16 уз, имел танкер «Федор Литке», находясь на траверсе поселка Харасавэй, расположенного на западном берегу полуострова Ямал. Линии пути танкеров на этом участке друг от друга расходятся на значительное расстояние, захватывая обширную часть акватории Карского моря.

Линии пути движения танкеров сходятся узкую полосу при входе в пролив Карские Ворота со стороны Карского моря. В проливе Карские Ворота скорость судов находилась в диапазоне от 10,9 до 14,3 уз. При выходе из пролива Карские Ворота в Баренцево море скорость танкеров увеличивалась до 18 – 19 уз. Линии пути танкеров в Баренцевом море расходятся в зависимости от пункта назначения.

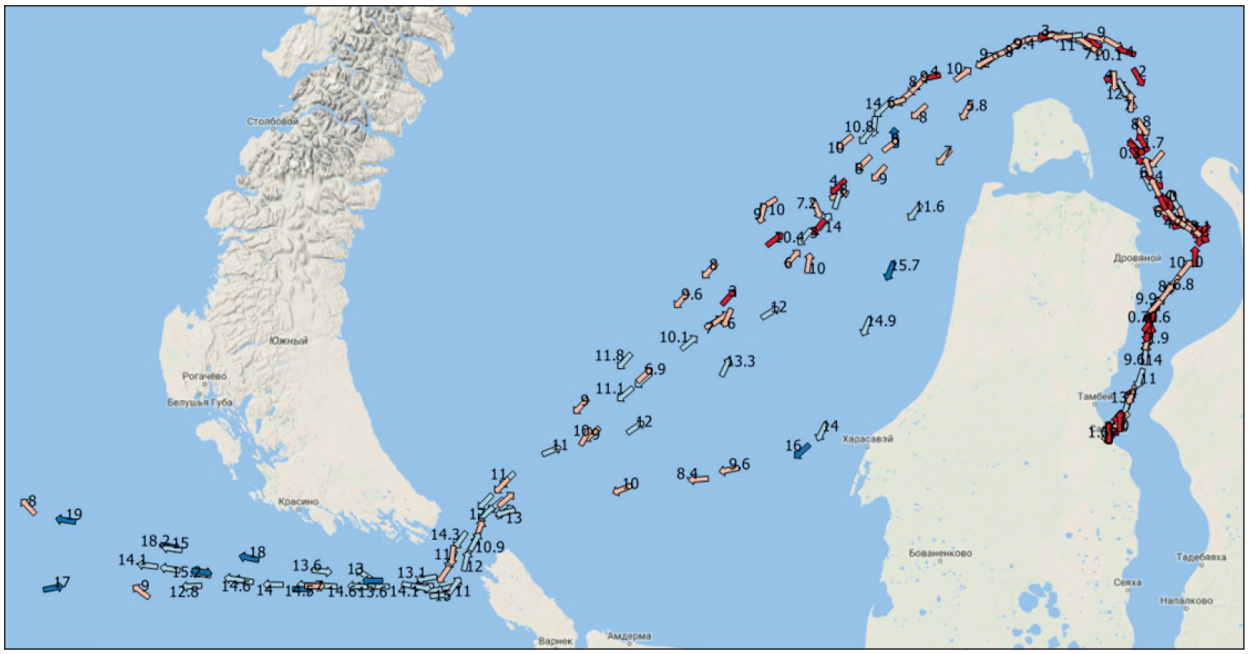


Рис. 4. Скорость и направление движения танкеров на маршруте
Карские Ворота — Обская Губа (п. Сабетта)

Обсуждение (Discussion)

Опыт использования ГИС для мониторинга местоположения и скорости движения судов на различных участках акватории СМП показал, что информационная система позволяет с высокой точностью и оперативностью получать необходимую информацию. В результате сравнения полученных результатов с методикой в работе [16] была подтверждена возможность качественного и количественного описания транспортных процессов в Арктике с использованием геоинформационных систем.

Рейсы, выполненные новыми СПГ-танкерами в период с ноября 2017 г. по март 2018 г., позволили получить фактическое подтверждение целесообразности использования крупнотоннажных танкеров для работы на трассах СМП в режиме продленной навигации в период ноябрь-январь. Средняя скорость СПГ-танкеров при самостоятельном плавании в ледовых условиях начала

зимней навигации 2018 г. оставляла 9 уз, что соответствует менее 50 % от уровня максимальной скорости танкеров данного проекта. Анализ скоростных режимов движения танкеров показал отсутствие явной зависимости изменения скорости от наличия или отсутствия груза, аналогичная ситуация относится и к осадке танкера.

Глубины и гидрографическая изученность рельефа дна Карского моря обеспечили безопасное плавание танкеров в широкой полосе движения, расположенной в центральной части акватории между проливом Карские Ворота и полуостровом Ямал. Глубины и гидрографическая изученность рельефа на участке маршрута между портом Сабетта и точкой, расположенной к северу от полуострова Ямал, где все линии пути движения танкеров сливаются практически в одну линию, не позволяют судам отклоняться от этой линии на значительное расстояние.

Выводы (Summary)

1. Получены уникальные данные о скоростных режимах движения первых судов из новой серии СПГ-танкеров, выполнивших первые рейсы регулярных транзитных маршрутов и маршрутов экспорта природного сжиженного газа из акватории Обской Губы, что в ближайшие годы станет одной из тенденций развития СМП.

2. Данные о маршрутах СПГ-танкеров были оформлены в отдельные слои ГИС СМП и будут положены в основу статистического ряда будущих наблюдений, относящихся к параметрам самостоятельного плавания судов в ледовых условиях круглогодичной навигации, а также плавания судов под проводкой ледоколов.

3. В дальнейшем планируется проводить регулярный сбор статистических данных для всех групп судов, которые будут выполнять плавание в акватории СМП в различные периоды навигации. Представленные данные могут быть использованы для выработки рекомендаций по совершенствованию организации судоходства в арктических морях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р.

2. Справка о Комплексном проекте развития Северного морского пути до 2030 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://government.ru/orders/selection/405/18405/ (дата обращения: 14.03.2018).

3. *Олерский В.* Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия – XXI век. — 2015. — № 29 (2). — С. 8–9.

4. Официальный сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html (дата обращения: 26.02.2018).

5. *Ольховик Е. О.* Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.

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

7. *Afonin A.* Methods development for assessing sea depth on the northern sea route depending on the recording of hydrographical relief details / A. Afonin, A. Tezikov, E. Olhovik // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. — 2017.

8. Программа для ЭВМ № 2016618040. Расчет предельной осадки судна на трассах Северного морского пути с учётом гидрографической изученности / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик; зарегистрирована в ФИПС 20.07.2016.

9. *Афонин А. Б.* Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.

10. *Eleftherios T. I.* An Interactive Multiobjective Model for the Strategic Maritime Transportation of Petroleum Products: Risk Analysis and Routing / T. I. Eleftherios // Safety Science. — 2001. — Vol. 39. — Is. 1-2. — Pp. 19–29. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4.

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

12. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей европейской части России / И. О. Думанская. — М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. — 605 с.

13. *Афонин А. Б.* Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.

14. *Сазонов К. Е.* Влияние мелководья на ледовые качества судна / К. Е. Сазонов, А. В. Рыжков // Мир транспорта. — 2013. — Т. 11. — № 4 (48). — С. 40–47.

15. *Клюев В. В.* Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Клюев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

16. *Eguíluz V. M.* A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014 / V. M. Eguíluz, J. Fernández-Gracia, X. Irigoien, C. M. Duarte // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — Pp. 30682. DOI: 10.1038/srep30682.

REFERENCES

1. Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. № 1734-r.

2. Spravka o Kompleksnom proekte razvitiya Severnogo morskogo puti do 2030 goda. Web. 14 March 2018 <http://government.ru/orders/selection/405/18405/>.

3. Olerskii, V. "Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti." *Transportnaya strategiya - XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.

4. Federal State Budgetary Institution The Northen Sea Route Administration. Web. 26 Feb. 2018 <http://www.nsra.ru/en/glavnaya/novosti/n19.html>.

5. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "Information model of maritime transport flows of the North sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.

6. Afonin, Andrej Borisovich, Evgenij Olegovich Ol'hovik, and Aleksandr L'vovich Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.

7. Afonin, A., A. Tezikov, and E. Olhovik. "Methods development for assessing sea depth on the northern sea route depending on the recording of hydrographical relief details." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC*. 2017.

8. Tezikov, A.L., A. B. Afonin, and E.O. Ol'khovik. Computer program № 2016618040. Raschet predel'noi osadki sudna na trassakh Severnogo morskogo puti s uchetom gidrograficheskoi izuchennosti. Registered 20 July 2016.

9. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.

10. Eleftherios, T.Iakovou. "An Interactive Multiobjective Model for the Strategic Maritime Transportation of Petroleum Products: Risk Analysis and Routing." *Safety Science* 39.1-2 (2001): 19–29. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00022-4.

11. Mironov, E.U., I.M. Ashik, V.I. Dymov, M.Yu. Kulakov, and S.V. Klyachkin. "Modeli i metody rascheta i prognoza ledovykh i okeanograficheskikh uslovii v arkticheskikh moryakh." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

12. Dumanskaya, I.O. *Ledovye usloviya morei evropeiskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG-SOTsIN, 2014.

13. Afonin, Andrej B., Ivan Ju. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.

14. Sazonov, Cyril E., and Alexander V. Ryzhkov. "Shallow water impact on ice performance of the ships." *Mir transporta* 11.4(48) (2013): 40–47.

15. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. "Formalization of the assessment of safety of routes of the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

16. Eguíluz, Victor M., Juan Fernández-Gracia, Xabier Irigoien, and Carlos M. Duarte. "A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014." *Scientific reports* 6 (2016): 30682. DOI: 10.1038/srep30682.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ol'khovik, Evgeniy O. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *olhovikeo@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-309-317

INVESTIGATION OF ELASTIC DEFLECTIONS OF LIFTING-GATE UNDER A HEAD WITH ACCOUNT HYDROSTATIC OF INFLUENCE OF DESTRUCTIVE PROCESSES OF DETERIORATION

M. L. Kuzmitskiy, N. M. Ksenofontov, V. B. Chistov

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

The research is execute on the example of the main gate of the upper head of the locks No. 25-26 of the Saratov Hydraulic project of the Federal State-Funded Institution «Administration of the Volga Basin». Follows from results of earlier executed researches that the main destructive processes of aging reducing technical condition of gate and locks of navigable hydraulic engineering constructions are corrosion and corrosion and fatigue damages of their elements which realization is establish on separate elements of the studied metalwork. Use as the diagnostic parameter of size of corrosion wear of elements at high degree of roughness of their surface because of impossibility of his measurement with a necessary accuracy and lack of correlation at this operational phase of a metal construction with process of corrosion and fatigue process of the damage defining actual state of gate is incorrect. In process, growth of size corrosion wear elements the deflection gate which is the integrated indicator characterizing their elastic deformation will increase. The provide value of the allowed deflection of lifting and lowering gate under a pressure can't be considered now as the indicator correlating with change of a condition of their elements in time. The possibility of use of the provide value of an admissible deflection of gate as the diagnostic parameter of their technical condition is considered. Analytical evaluation of change of size of a deflection of lifting-gate from a hydrostatic pressure at various values of corrosion wear of their elements is execute. The discrepancy of the standard allowed values of a deflection of the lower girder of gate to the size of corrosion damage of their power elements is established. The field of possible realization of process of corrosion fatigue damage of power elements of the considered metalwork is define. The results presented in work can be used for correction of the established criteria values of indicators of safety for the considered metalwork of gate. The stated technique of check of a possibility of use of an indicator of a deflection of the lower crossbar of lifting-gate under a pressure as the diagnostic parameter of their technical condition can be used when checking efficiency of other diagnostic indicators of elements regulated by the specifications and technical documentation of the mechanical equipment of navigable hydraulic engineering constructions both operated, and designed.

Keywords: navigation lock, lifting-gate, diagnostic parameter, head, elastic deformation, corrosion wear, corrosion fatigue damage, accepted value, assurance coefficient.

For citation:
Kuzmitskiy, Mikhail L., Nikolai M. Ksenofontov, and Valentin B. Chistov. "Investigation of elastic deflections of lifting-gate under a head with account hydrostatic of influence of destructive processes of deterioration." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 309–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-309-317.

УДК 626.422.25; 656.627.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ПРОГИБОВ ПОДЪЕМНО-ОПУСКНЫХ ВОРОТ ПОД ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ НАПОРОМ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ

М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, В. Б. Чистов

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

Исследование выполнено на примере основных ворот верхней головы шлюза № 25-26 Саратовского гидроузла ФБУ «Администрация Волжского бассейна». Из результатов ранее выполненных исследований

следует, что основными деструктивными процессами старения, снижающими техническое состояние ворот и затворов судоходных гидротехнических сооружений, являются коррозионное и коррозионно-усталостное повреждения их элементов, реализация которых установлена на отдельных элементах исследуемых металлоконструкций. Использование в качестве диагностического параметра величины коррозионного износа элементов при высокой степени шероховатости их поверхности, из-за невозможности его измерения с необходимой точностью, и отсутствие корреляции на этом этапе эксплуатации металлоконструкции с процессом коррозионно-усталостного процесса повреждения, определяющего фактическое состояние ворот, является некорректным. По мере роста величины коррозионного изнашивания элементов прогиб ворот, являющийся интегральным показателем, характеризующим их упругую деформацию, будет увеличиваться. Установленное значение допускаемого прогиба подъемно-опускных ворот под напором в настоящее время не может рассматриваться как показатель, коррелирующий с изменением состояния их элементов во времени. Рассмотрена возможность использования регламентированного значения допустимого прогиба ворот в качестве диагностического параметра их технического состояния. Выполнена аналитическая оценка изменения величины прогиба подъемно-опускных ворот от гидростатического напора при различных значениях коррозионного изнашивания их элементов. Установлено несоответствие нормативных допустимых значений прогиба нижнего ригеля ворот величине коррозионного повреждения их силовых элементов. Определена область возможной реализации процесса коррозионно-усталостного повреждения силовых элементов рассматриваемых металлоконструкций. Представленные в работе результаты могут быть использованы с целью корректировки установленных критериальных значений показателей безопасности для рассматриваемых металлоконструкций ворот. Изложенная методика проверки возможности использования показателя прогиба нижнего ригеля подъемно-опускных ворот под напором в качестве диагностического параметра их технического состояния может быть использована при проверке эффективности других регламентированных нормативно-технической документацией диагностических показателей элементов как эксплуатируемого, так и проектируемого механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: судоходный шлюз, подъемно-опускные ворота, диагностический параметр, гидростатический напор, упругая деформация, коррозионный износ, коррозионно-усталостное повреждение, допустимое значение, запас прочности.

Для цитирования:
Кузьмицкий М. Л. Исследование упругих прогибов подъемно-опускных ворот под гидростатическим напором с учетом воздействия деструктивных процессов старения / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 309–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-309-317.

Введение (Introduction)

В настоящей работе объектом исследования являются основные ворота верней головы шлюза № 25 – 26 (ширина камеры 30 м) Саратовского гидроузла ФБУ «Администрация Волжского бассейна» (рис. 1) [1]. При исследовании использованы материалы, полученные при обследовании рассматриваемых подъемно-опускных ворот (ПОВ) [2], а также результаты оценки технического состояния других ворот и затворов судоходных шлюзов [3], в том числе ультразвуковой толщинометрии (УЗТ), выполняемой в соответствии с требованиями [4], [5].

Основными деструктивными процессами, снижающими техническое состояние ворот и затворов судоходных шлюзов, являются *коррозионное изнашивание* [6] − [10] и *коррозионно-усталостное разрушение* [11], [12]. Примеры коррозионных повреждений несущих элементов и коррозионно-усталостных повреждений стрингеров ПОВ представлены на рис. 2 и 3.

В качестве интегрального показателя, характеризующего упругую деформацию ПОВ под напором нормативным документом [4], установлена величина допустимого прогиба $[У]$ = 30 мм. При отсутствии коррозионных повреждений (утонении элементов $\Delta S \rightarrow 0$) и соответствии условий нагружения принятым при проектировании (рис. 4) [1], [13] расчетный прогиб $У$ соответствует новому изделию и составляет для рассматриваемых ПОВ $У_0$ = 15,9 мм при величине изгибающих напряжений в расчетном сечении (рис. 5) σ_a = 79,6 МПа. По мере коррозионного изнашивания элементов сечения нижнего ригеля ворот с присоединенными поясками обшивки (рис. 5), прогиб ворот будет увеличиваться.

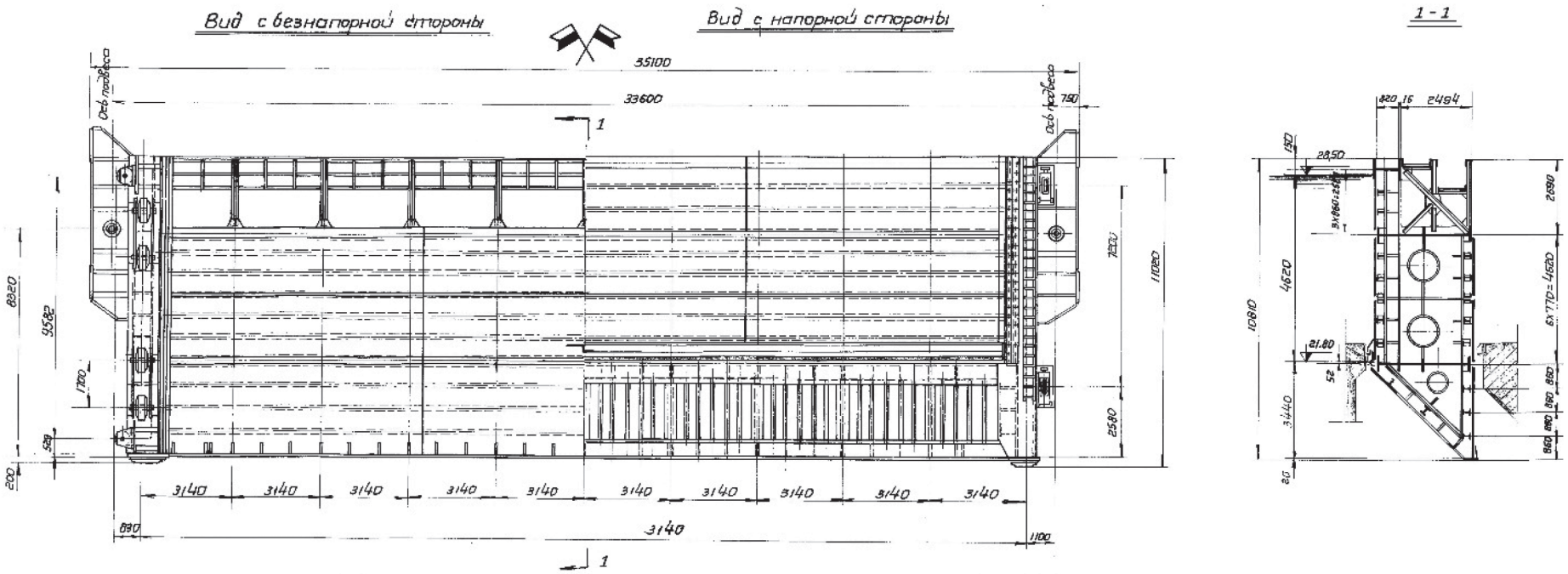


Рис. 1. Схема конструкции основных ворот верхней головы шлюза № 25 – 26 Саратовского гидроузла



Рис. 2. Коррозионное повреждение элементов внутри подъемно-опускных ворот



Рис. 3. Коррозионно-усталостное повреждение полки стрингера подъемно-опускных ворот

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

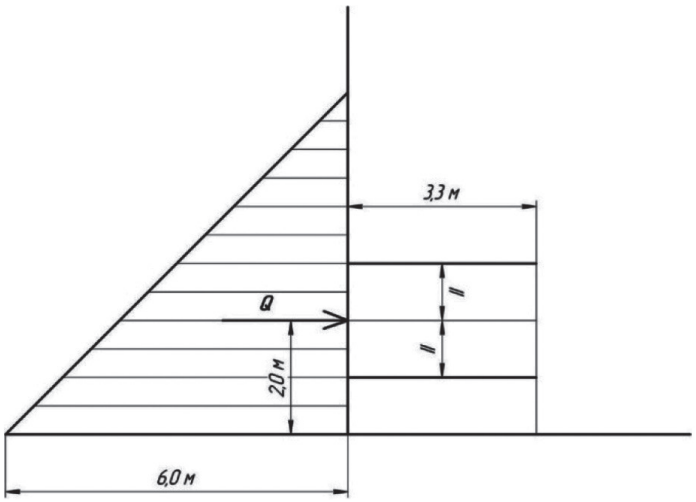


Рис. 4. Схема нагружения ПОВ в рабочем положении

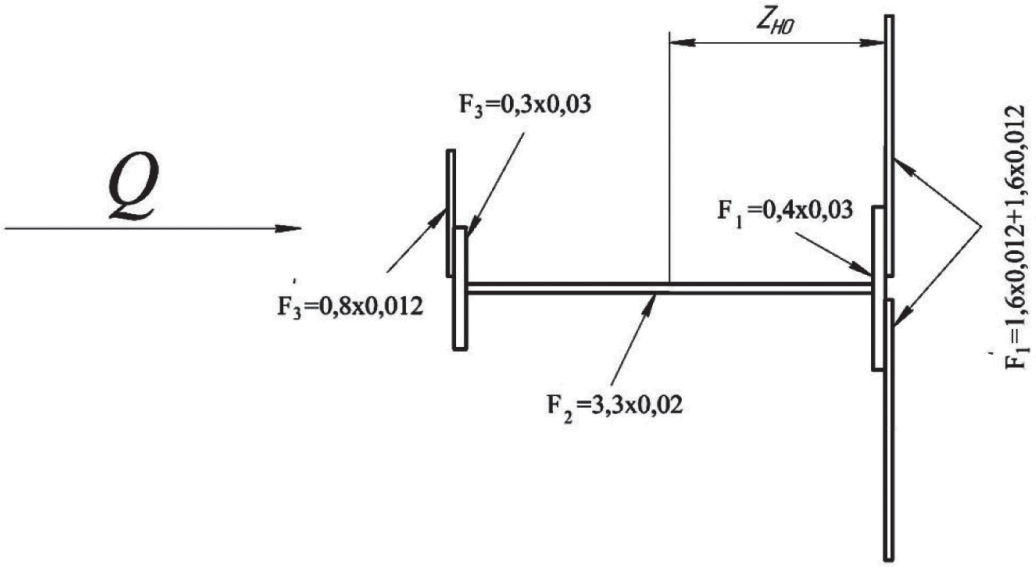


Рис. 5. Расчетное сечение нижнего ригеля подъемно-опускных ворот (размеры элементов указаны в метрах)

Согласно [4], утонение основных связей ворот $\Delta S_{\text{пр}}$ не должно превышать 15 %. Вероятно, если рассматривать прогиб ворот в качестве контролируемого параметра их технического состояния, для этого должна быть установлена величина $У_{\Delta S_{\text{пр}}}$. Необходимость данного условия подтверждается фактом перехода изделия (ворот) из работоспособного в ограниченно-работоспособное техническое состояние. Возможность и сроки дальнейшей безопасной эксплуатации при этом могут быть установлены путем дополнительного обследования с использованием УЗТ. Однако по мере роста шероховатости поверхности элементов, в частности из-за увеличения плотности коррозионных язв и их размеров, погрешность измерения ΔS возрастает [6], что ограничивает возможность использования этого показателя для оценки технического состояния ворот и затворов при их уровнях технического состояния, определяемых критериальными значениями К2 (19 %) и К3 (25 %) в соответствии с нормативами документа [14].

Актуальность данного обстоятельства для элементов металлоконструкций судоходных гидротехнических сооружений возрастает в связи с тем, что процесс коррозии для них развивается, как правило, с обеих сторон элементов. Дальнейшая эксплуатация ворот будет сопровождаться

ростом утонения элементов ΔS, увеличением прогиба ворот $У$ и ростом нормальных напряжений от изгиба σ_a от гидростатического напора.

В большинстве случаев элементы ворот и затворов судоходных шлюзов работают при переменных нагрузках в условиях контакта с агрессивной средой, что предопределяет возможность реализации коррозионно-усталостного процесса [11], [12], сопровождающегося увеличением язвенного разрушения и трещинообразованием. Техническое состояние ворот в этом случае определяется как аварийное [14]. По данным [12], процесс коррозионно-усталостного разрушения реализуется при напряжениях $\sigma^{к}_{-1} = 0{,}2 – 0{,}5\sigma_{-1}$ (30 − 73 МПа). По материалам [11], ограниченный предел коррозионной усталости для углеродистых сталей составляет 94 − 173 МПа. Несмотря на относительно большой диапазон приведенных значений $\sigma^{к}_{-1}$, начало развития коррозионно-усталостного процесса является фактически окончанием срока безопасной эксплуатации металлоконструкции с учетом требований [4].

Из приведенных материалов следует, что при достижении изгибающих напряжений значений σ_a, близких к $\sigma^{к}_{-1}$, начинается развитие коррозионно-усталостного процесса, т. е. прогиб ворот под напором при напряжениях в расчетном сечении $\sigma_a \approx \sigma^{к}_{-1}$ может рассматриваться как предельно допустимое значение контролируемого параметра, превышение которого приведет к неконтролируемому развитию процесса разрушения металлоконструкции с учетом результатов исследований [15] и рекомендаций [11], [12]. Для материала ПОВ (сталь М16С) в качестве рекомендуемого значения $\sigma^{к}_{-1}$ может быть принята величина ~ 110 МПа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим возможность использования регламентированного значения допустимого прогиба ПОВ в качестве диагностического параметра их технического состояния, в том числе с учетом требований ГОСТ 27518 [16]. Документом установлены следующие основные требования к диагностическим параметрам состояния изделия:

– наличие устойчивой корреляции с техническим состоянием изделия;

– возможность измерения при проведении диагностики изделия;

– достоверность и точность результатов измерения;

– повторяемость (возможность воспроизводства результатов).

Нормативное значение допустимого прогиба ПОВ под напором фактически представляет собой предельно-допустимое значение контролируемого показателя, позволяющего получить две оценки состояния «годен», «негоден» и поэтому, по сути, не может рассматриваться как параметр, коррелирующий с изменением состояния элемента во времени.

Измерение упругого прогиба ПОВ может быть выполнено в процессе эксплуатации при условии проведения необходимых подготовительных работ. При его значениях в пределах установленного предельно-допустимого значения точность выполняемых измерений в диапазоне 0,05 – 0,1 от измеряемой величины представляется достаточной. В случае установления необходимости измерения промежуточных значений прогиба достаточность существующей точности измерения требует проверки.

Выполнены аналитические расчеты изменения характеристик элементов, формирующих расчетное сечение (см. рис. 5), и показателей напряженно-деформированного состояния основных связей ПОВ под воздействием на них гидростатического напора при различных значениях их коррозионного износа. В расчете было принято условие равномерного коррозионного изнашивания элементов расчетного сечения, а также не учитывалось наличие выреза в стенке нижнего ригеля и элементы подкрепления (стрингеры).

Результаты (Results)

Расчетные характеристики принятого сечения нижнего ригеля ПОВ (см. рис. 5) при $\Delta S = 0$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики принятого сечения нижнего ригеля ПОВ

Обозначение элемента сечения	F_i, м^2	Z_i, м	S_i, м^3	I_i, м^4	$I_{собств}$
	1	2	3	4	5
$F_1^{\|}$	0,0384	0	0	0	–
F_1	0,012	0	0	0	–
F_2	0,066	1,665	0,11	0,183	0,060
F_3	0,009	3,33	0,03	0,100	–
$F_3^{\|}$	0,0096	3,33	0,03	0,106	–
$\sum$	0,135	–	0,172	0,449	

Примечания:

1. F_i — площади поперечных сечений частей составного профиля.
2. Z_i — расстояние от центра тяжести площади F_1 до центра тяжести i-й площади.
3. $S_i = F_i Z$ — статический момент i-й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1.
4. $I_i = F_i Z_i^2$ — момент инерции i-й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1.
5. $I_{собств} = \frac{sh^3}{12}$ — собственный момент инерции, где h — высота элемента.

Расчетные значения прогибов, изгибающих напряжений и коэффициентов запаса по показателям предела текучести материала $\sigma_т$ (230 МПа) и допускаемого напряжения при циклическом нагружении изделия [σ] (153 МПа) [1] при различных значениях утонения элементов сечения (см. рис. 5) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета изменения прогиба ПОВ при различной величине коррозионного износа их элементов

Этапы развития процесса коррозионного повреждения		Момент сопротивления W, м^3	Прогиб нижнего ригеля $У$, мм	Нормальные напряжения σ_a, МПа	Коэффициент запаса по показателю $\sigma_т$	Коэффициент запаса по показателю σ
ΔS, мм	$\Delta S_{отн}$, %					
0	0	0,135	15,9	79,6	2,9	2,0
0,77	5	0,129	16,5	83,0	2,8	1,9
1,54	10	0,124	17,2	86,6	2,7	1,8
2,31	15	0,118	18,0	90,6	2,5	1,7
3,07	20	0,113	18,8	95,0	2,4	1,6
3,84	25	0,108	19,7	99,8	2,3	1,6
4,60	30	0,102	20,7	105,1	2,2	1,5
5,37	35	0,097	21,8	111,0	2,1	1,4
...	...	...	...	...	...	...
9,20	60	0,069	29,9	154,9	1,5	1,0
...	...	...	...	...	...	...
12,00	78	0,049	41,1	218,8	1,1	0,7

Примечания:

1. ΔS — физический износ элементов ПОВ.
2. $\Delta S_{отн}$ — относительный износ элементов ПОВ, определяемый по формуле

$$\Delta S_{отн} = \sum \frac{b_i \frac{\Delta S_i}{S_i}}{\sum b_i},$$

где b_i — ширина элемента (рис. 5); S_i — проектная толщина элемента.

3. Прогиб нижнего ригеля ПОВ определяется по формуле

$$y\left(\frac{L}{2}\right)=\frac{5}{384}\cdot\frac{qL^4}{EI},$$

где L = 31,2 м — длина перекрываемого отверстия; E = 2·105 МПа — модуль нормальной упругости стали; I — момент инерции сечения, м^4.

4. Желтым цветом в таблице выделена область начала реализации коррозионно-усталостного процесса.

Обсуждение (Discussion)

Наименование параметров, определяющих техническое состояние рассматриваемых ворот и их критериальные показатели представлены в табл. 3. Полученные в табл. 2 результаты расчетных исследований указывают, в частности, на несоответствие принятых допустимых значений прогиба нижнего ригеля ПОВ от гидростатического напора установленным предельно-допустимым значениям коррозионного износа элементов рассматриваемого сечения. Так, допускаемый прогиб [$У$] = 30 мм, регламентированный [4], [14], соответствует относительной величине коррозионного износа $\Delta S_{отн}$ = 60 % при допустимом значении данного контролируемого параметра [$\Delta S_{отн}$] = 15 % [4], [14]) и фактически допускает эксплуатацию ворот при реализации коррозионно-усталостного процесса, сопровождающегося трещинообразованием.

Полученное допустимое расчетное значение прогиба нижнего ригеля ПОВ под напором ([$У$] ~ 21 мм) может быть скорректировано по результатам его измерения на новом изделии (ΔS = 0), учитывающем в том числе фактические условия их нагружения.

Представляется целесообразным при рассмотрении предлагаемых диагностических параметров выполнить их проверку методом конечных элементов.

Таблица 3

Наименование показателей, определяющих техническое состояние верхних основных ворот шлюза № 25 – 26 ФБУ «Администрация Волжского бассейна»

Наименование показателей, определяющих техническое состояние	Утвержденные критериальные значения показателя		
	К 1	К 2	К 3
Стрела прогиба ригелей под напором, мм	30	32	35
Коррозионный износ м/к, %	17	19	25
Фильтрационный расход, л/с	6	8	10
Износ путей, мм	8	9	10
Деформации и повреждения в силовых элементах и зонах сварных швов металлоконструкций	Вмятины до 25 мм	Прогибы ригелей и диафрагм до 25 мм	Трещины или деформация силовых элементов

Выводы (Summary)

1. Предельно-допустимое значение прогиба нижнего ригеля ПОВ под напором не соответствует допустимым значениям утонения элементов ворот, указанных в нормативных документах.

2. Значение упругого прогиба ПОВ под напором может рассматриваться как диагностический параметр при условии учета вида и динамики деструктивных процессов, а также фиксации фактов перехода технического состояния изделий на другой уровень.

3. Использование в [14] при различных уровнях технического состояния металлоконструкций К2 и К3 в качестве диагностического параметра утонения элементов представляется некорректным ввиду невозможности его измерения с необходимой точностью при высокой шероховатости поверхности элементов, а также отсутствия его корреляции с процессом коррозионно-усталостного разрушения, определяющего фактическое состояние изделия.

4. Изложенная методика проверки возможности использования показателя прогиба ПОВ под напором в качестве диагностического параметра их состояния может быть использована при проверке эффективности других показателей состояния элементов механического оборудова-

ния судоходных гидротехнических сооружений, измерение которых регламентировано положениями нормативно-технической документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саратовская ГЭС. Шлюз. Верхняя голова. Ворота опускные 30.0-5.5-5.5. Пояснительная записка и расчет. — Л.: Гидростальпроект, 1966. — 85 с.

2. *Кузьмицкий М. Л.* Проведение расчетных исследований с анализом прочностного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций аварийно-ремонтных ворот, верхних рабочих ворот, нижних двустворчатых ворот и ремонтных двустворчатых ворот и затворов водопроводных галерей шлюза № 17–18 Чебоксарского РГСиС и шлюза № 25-26 Балаковского РГСиС: отчет о НИР / М. Л. Кузьмицкий. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 118 с.

3. *Полонский Г. А.* Механическое оборудование гидротехнических сооружений / Г. А. Полонский. — М.: Энергия, 1974. — 343 с.

4. МУ 050-025-2001. Методические указания. Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. — М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. — 86 с.

5. ГОСТ Р ИСО 16809-2015 Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.

6. *Kuz'mitskii M. L.* Corrosive wear of gate and valve metal structures at navigation locks and assessment of their remaining lifetime / M. L. Kuz'mitskii, N. M. Ksenofontov // Power Technology and Engineering. — 2016. — Vol. 50. — Is. 2. — Pp. 164–167. DOI: 10.1007/s10749-016-0677-8.

7. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справ.: В 2 т. / под ред. А. А. Герасименко. — М.: Машиностроение, 1987. — Т. 1. — 688 с.

8. *Marcus Ph.* Corrosion Mechanisms in Theory and Practice / Ph. Marcus. — Third Edition. — CRC Press, 2017. — 941 p.

9. *Guyer J. P.* An Introduction to Periodic Inspection of Steel Hydraulic Structures / J. P. Guyer. — Guyer Partners, 2017. — 32 p.

10. *Mahmoud H.* Fatigue and fracture life-cycle cost assessment of a Miter gate with multiple cracks / H. Mahmoud, A. Chulahwat, G. Riveros // Engineering Failure Analysis. — 2018 — № 83. — 57 p.

11. Форрест П. Усталость металлов / П. Форрест. — М.: Машиностроение, 1968. — 352 с.

12. Когаев В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. — М.: Машиностроение, 1991. — 319 с.

13. *Кузьмицкий М. Л.* Расчетные исследования влияния коррозионного износа на прочность металлоконструкций ворот и затворов шлюзов / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1(35). — С. 60–66. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-60-66.

14. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений. — М., 2011. — 136 с.

15. *Похмурский В. И.* Коррозионная усталость металлов / В. И. Похмурский. — М.: Металлургия, 1985. — 206 с.

16. ГОСТ 27518-87 Диагностирование изделий. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 4 с.

REFERENCES

1. *Saratovskaya GEHS. Shlyuz. Verhnyaya golova. Vorota opusknye 30.0-5.5-5.5. Poyasnitel'naya zapiska i raschet*. L.: Gidrostal'proekt, 1966.

2. Kuzmitskiy, M.L. *Provedenie raschetnyh issledovanij s analizom prochnostnogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa metallokonstrukcij avarijno-remontnyh vorot, verhnih rabochih vorot, nizhnih dvustvorchatyh vorot i remontnyh dvustvorchatyh vorot i zatvorov vodoprovodnyh galerej shlyuza № 17-18 Cheboksarskogo RGSiS i shlyuza №25-26 Balakovskogo RGSiS: Otchet o NIR*. SPb: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2014.

3. Polonskij, G.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie gidrotekhnicheskih sooruzhenij* M.: Ehnergiya, 1974.

4. Russian Federation. Methodical instructions MU 050-025-2001. Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya metallokonstrukcij vorot i zatvorov SGTS. M.: FGUP CBNTIMT RF, 2002.

5. Russian Federation. State Standard GOST R ISO 16809-2015. Non-destructive testing. Ultrasonic testing. Thickness measurement. M.: Standartinform, 2015.

6. Kuz'mitskii, M.L., and N.M. Ksenofontov. "Corrosive Wear of Gate and Valve Metal Structures at Navigation Locks and Assessment of Their Remaining Lifetime." *Power Technology and Engineering* 50.2 (2016): 164–167. DOI: 10.1007/s10749-016-0677-8.

7. Gerasimenko, A.A., ed. *Zashchita ot korrozii, stareniya i biopovrezhdenii mashin, oborudovaniya i sooruzhenii: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1987.

8. Marcus, Philippe. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. Third Edition. CRC Press, 2017.

9. Guyer, J. Paul. *An Introduction to Periodic Inspection of Steel Hydraulic Structures.* Guyer Partners, 2017.

10. Mahmoud H., A. Chulahwat, and G. Riveros "Fatigue and fracture life-cycle cost assessment of a Miter gate with multiple cracks." *Engineering Failure Analysis* 83 (2018):57−74.

11. Forrest, P. *Ustalost' metallov.* M.: Mashinostroenie, 1968.

12. Kogaev, V.P., and Yu.N. Drozdov. *Prochnost' i iznosostoikost' detalei mashin*. M.: Mashinostroenie, 1991.

13. Kuzmitskiy, Mikhail Leonidovich, Nikolai Mikhailovich Ksenofontov, and Valentin Borisovich Tchistov. "Calculated research influence corrosive wearon strength metal constructions gates navigation lock." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 60–66. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-60-66.

14. *Metodicheskie rekomendacii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i ocenke bezopasnosti sudohodnyh gidrotekhnicheskih sooruzhenij*. M., 2011.

15. Pohmurskij, V. I. *Korrozionnaya ustalost' metallov.* M.: Metallurgiya, 1985.

16. Russian Federation. State Standard GOST 27518-87. Diagnostics of items. General requirements. M.: Standartinform, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмицкий Михаил Леонидович —
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kuzmitskiymlspbuwc@mail.ru*

Ксенофонтов Николай Михайлович —
научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ksen_nm@mail.ru*

Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_sopromat@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuzmitskiy, Mikhail L. —
Dr. of Technical Sciences,
chief research scientist
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kuzmitskiymlspbuwc@mail.ru*

Ksenofontov, Nikolai M. —
Research scientist
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *ksen_nm@mail.ru*

Chistov, Valentin B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_sopromat@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330

LABORATORY INVESTIGATIONS OF ROAD WATER FREIGHT CONSTRUCTION

Yu. K. Ivanovskiy, K. P. Morgunov, G. G. Ryabov

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

The laboratory studies of the hydraulic characteristics of the culvert from corrugated metal pipes, which is a part of the road crossing over the Taunga River on the Lidoga – Vanino route, are described. In the absence of normatively defined design rules, the practice of hydraulic engineering provides for the possibility of conducting laboratory studies of the projected facility on large-scale models. This approach allows you to get the information necessary for the informed adoption of design design decisions at the pre-project stage. Proceeding from the fact that the defining criterion for similarity is the Froude number, a linear modeling scale of 1:32 is adopted. The tests were performed on a model manufactured and placed in a hydraulic tray of the laboratory of the 1Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The main objective of laboratory hydraulic research was to assess the possibility of safe passage through such a culvert construction of the maximum flow through the Taunga River. The measured parameters were: water flow in the bed, water levels in front of and behind the structure, maximum flow rates at the outlet of the culvert. The measurements were carried out using a complex based on a panel computer. A series of laboratory studies of the capacity of the structure was performed, depending on the level of underflooding of the inlet and outlet openings of the culvert, as well as various costs in the channel. As the defining conditions are taken: provision of a non-pressure flow regime in corrugated pipes and flow rates that are safe for the stability of gabion structures. As a result of the research it was established that the culverts of the structure ensure that a given peak flow rate is missed in any possible modes with an allowable degree of filling, and flow velocities do not pose a threat to the stability of gabion structures.

Keywords: culvert, corrugated metal tube, laboratory modeling of hydraulic processes, capacity of the structure, degree of channel filling.

For citation:
Ivanovskiy, Yuri K., Konstantin P. Morgunov, and Georgiy G. Ryabov. "Laboratory investigations of road water freight construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330.

УДК 626.4.421

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОДОРОЖНОГО ВОДОПРОПУСКНОГО СООРУЖЕНИЯ

Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов

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

Описаны лабораторные исследования гидравлических характеристик водопропускного сооружения из гофрированных металлических труб, входящего в состав автодорожного перехода через реку Таунга на трассе Лидога – Ванино. При отсутствии нормативно определенных правил проектирования практика гидротехнического строительства предусматривает возможность проведения лабораторных исследований проектируемого объекта на масштабных моделях. Такой подход позволяет на предпроектной стадии получать информацию, необходимую для обоснованного принятия конструктивных проектных решений. Исходя из того, что определяющим критерием подобия является число Фруда, принят масштаб линейного моделирования, равный 1:32. Испытания выполнены на модели, изготовленной и размещенной в гидравлическом лотке лаборатории ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлась оценка возможности безопасного пропуска через такое водопропускное сооружение максимального расхода, проходящего по реке Таунга. Измеряемыми параметрами являлись расход воды в русле, уровни воды перед сооружением и за ним, максимальные скорости потока на выходе из водопропускного сооружения. Измерения проводились с использованием комплекса на базе панельного

компьютера. Выполнена серия лабораторных исследований пропускной способности сооружения в зависимости от уровня подтопления входного и выходного отверстий водопропускного сооружения, а также различных расходов в русле. В качестве определяющих условий приняты обеспечение безнапорного режима течения в гофрированных трубах и скоростей потока, безопасных для устойчивости габионных конструкций. В результате исследований установлено, что водопропускные галереи сооружения обеспечивают пропуск заданного пикового расхода в любых возможных режимах при допустимой степени наполнения, а скорости потока не создают угрозы устойчивости габионных конструкций.

Ключевые слова: водопропускное сооружение, гофрированная металлическая труба, лабораторное моделирование гидравлических процессов, пропускная способность сооружения, степень наполнения русла.

Для цитирования:
Ивановский Ю. К. Лабораторные исследования автодорожного водопропускного сооружения / Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 318–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-318-330.

Введение (Introduction)

Неотъемлемой частью практически любой автомобильной дороги являются водопропускные сооружения, обеспечивающие пропуск поверхностных вод под насыпью дороги. В подавляющем большинстве это традиционные бетонные трубы. Однако все большее применение при строительстве и реконструкции автомобильных дорог находят металлические гофрированные трубы. Исследованию гидравлических безнапорных и частично-напорных режимов течения в таких водопропусках посвящен ряд работ [1] – [3].

В последние годы водопропускные сооружения из гофрированных металлических труб используются также при проектировании и строительстве автодорожных переходов через небольшие водотоки (реки, каналы) вместо обычных мостов с опорами-быками. Например, несколько таких сооружений было запроектировано и реализовано при строительстве автомобильной дороги Хабаровск – Лидога – Ванино (рис. 1).



Рис. 1. Водопропускные сооружения из гофрированных труб на трассе Хабаровск – Лидога – Ванино

При отсутствии законодательно утвержденных технических регламентов по проектированию и расчету таких конструкций проектировщикам приходится использовать действующие нормативные документы, которые не всегда в полной мере отражают реальные процессы взаимодействия водных потоков с подобного рода водопропусками [4] – [6].

Актуальность проблемы обусловила разработку Центральным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ОАО ЦНИИС) ряда отраслевых дорожных методических документов [7] – [9]. В частности, ОДМ 218.2.001-2009 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)», рекомендованного к применению распоряжением Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. № 252-р. Однако перенос условий гидравлической работы гладкостенных труб на гофрированные трубы, как это сделано в некоторых случаях разработчиками ОДМ, вряд ли можно считать корректным и оправданным.

При отсутствии нормативно определенных правил проектирования практика гидротехнического строительства предусматривает возможность проведения лабораторных исследований проектируемого объекта на масштабных моделях. Такой подход позволяет на предпроектной стадии получать информацию, необходимую для обоснованного принятия конструктивных проектных решений. Лабораторные исследования, выполненные на основе теории подобия, в этом случае являются необходимым, а порой и единственно возможным инструментом, обеспечивающим проектировщика данными, достоверно отражающими гидравлические процессы, обусловливающие работу сооружения и его влияние на окружающую среду.

В настоящей работе представлены материалы лабораторных гидравлических исследований пропускной способности искусственного водопропускного сооружения, заложенного в проекте автомобильного перехода через реку Таунга на автодороге Хабаровск – Лидога – Ванино. Строительство автомобильной дороги Хабаровск – Лидога – Ванино с подъездом к г. Комсомольск-на-Амуре обусловлено необходимостью создания автомобильного сообщения между административным центром края г. Хабаровском и Тихоокеанским побережьем (рис. 2). Дорога позволяет также заместить недостающие пропускные мощности железной дороги на участке Комсомольск-на-Амуре – Ванино.

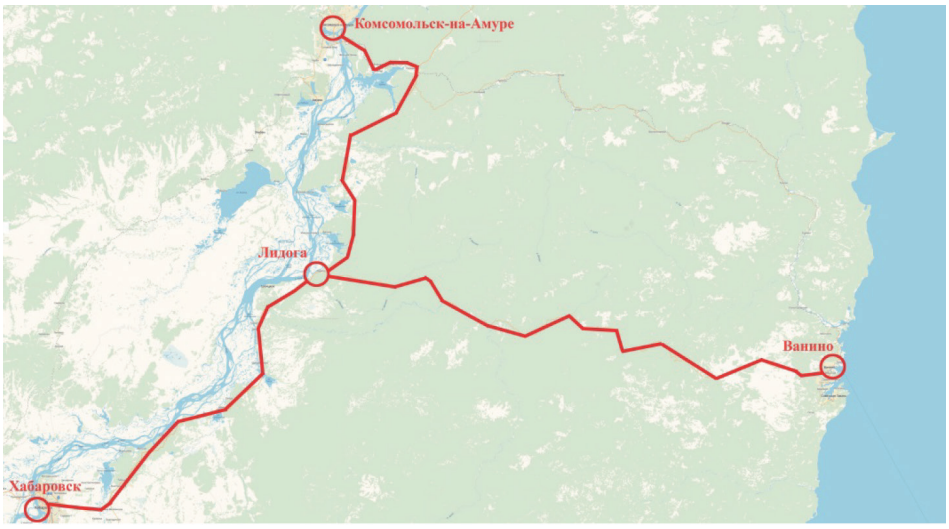


Рис. 2. Схема автодороги Хабаровск – Лидога – Ванино
с подъездом к Комсомольску-на-Амуре

Строительство автомобильной дороги протяженностью 347 км началось в 1997 г. До этого времени автомобильная дорога Лидога – Ванино не имела сквозного проезда и являлась отдельными участками лесовозных дорог со стороны поселков Лидога и Ванино. Окончательно автодорога сдана в эксплуатацию в октябре 2017 г. Проложенная по трем районам Хабаровского края пио-

нерная дорога обеспечила России выход к Тихому океану. По окончании её строительства была завершена последняя часть автомобильного сообщения евроазиатского международного «коридора» «Транссиб», которая имеет огромное стратегическое и экономическое значение, обеспечивая транспортный выход с федеральных автомагистралей «Амур» (Чита – Хабаровск), «Уссури» (Хабаровск – Владивосток) к морским международным портам Ванино и Советская Гавань. Автомобильная дорога спроектирована по нормам III технической категории с асфальтобетонным покрытием, по одной полосе в прямом и обратном направлениях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В соответствии с проектом, выполненным ОАО ЦНИИС по заданию Главного управления специального строительства при Спецстрое России «Дальспецстрой», на участке пересечения автодорогой реки Таунга взамен ранее запроектированного железобетонного трехпролетного моста длиной 24 м было предложено строительство искусственного сооружения «ПК 15 + 53» (рис. 3) с применением металлических гофрированных конструкций замкнутого сечения, засыпанных грунтом, по которому проложена автодорога. Водопропускное отверстие представлено тремя трубами из металлических гофрированных конструкций эллипсоидного сечения, размерами 12,152 × 7,810 м каждое (рис. 4). Длина сооружения из металлических гофрированных конструкций составляет 30,0 м по лотку. Конструкция состоит из металлических листов, изогнутых по радиусу и соединенных между собой на болтах.

Грунтовая призма вокруг сооружения выполняется из грунтов, пригодных для устройства подушки (щебенистого грунта). Кроме того, допускается применять мелкие пески, содержащие не более 10 % частиц размером менее 0,1 мм, в том числе не более 2 % глинистых частиц размером менее 0,005 мм. Модуль деформации грунта с учетом уплотнения до 0,95 должен быть не менее 300 кгс/см^2.

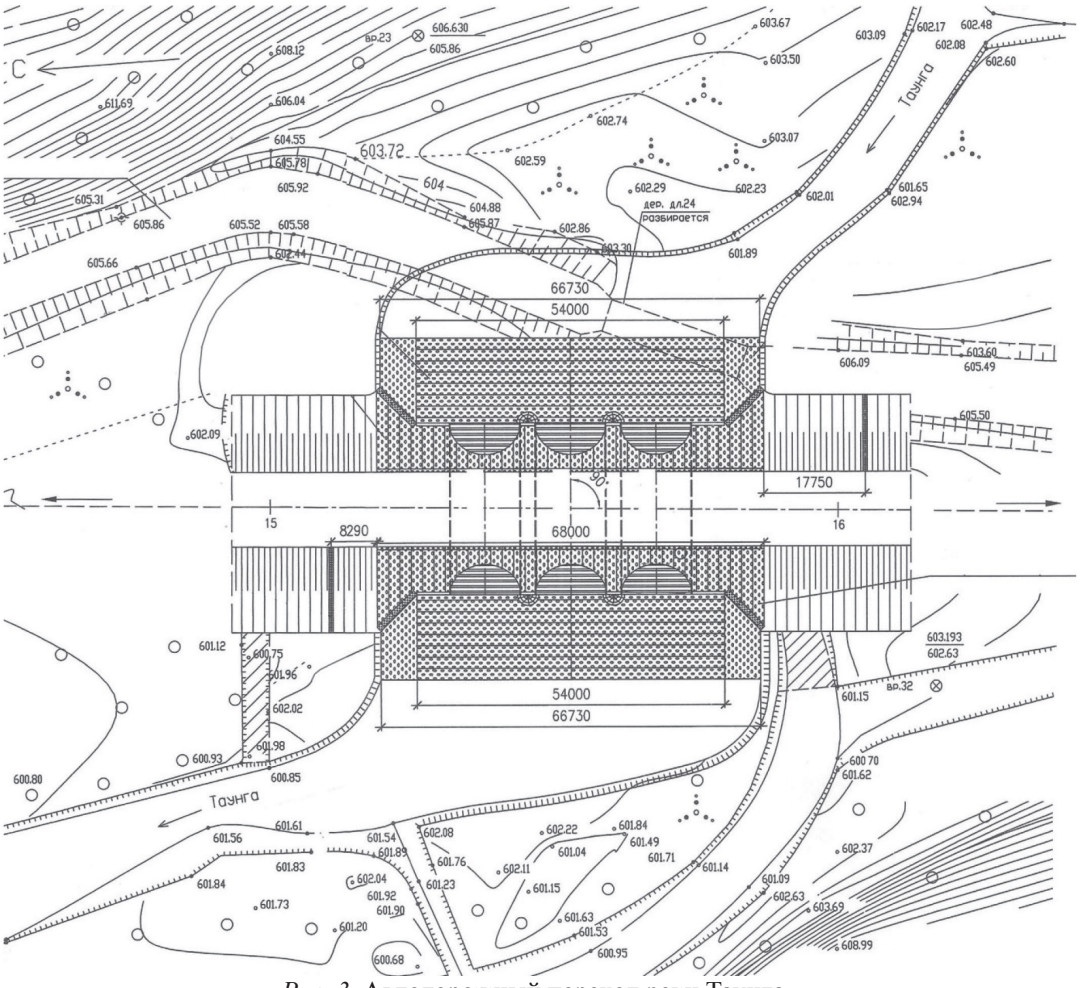


Рис. 3. Автодорожный переход реки Таунга

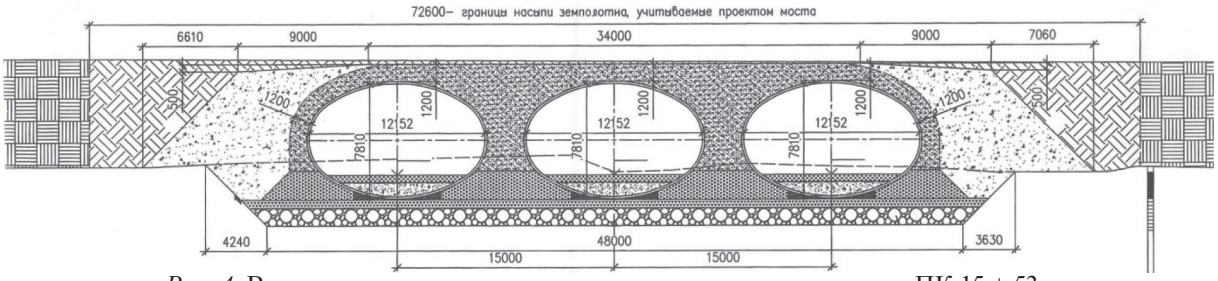


Рис. 4. Водопропускное отверстие искусственного сооружения «ПК 15 + 53»

Для предотвращения вымывания мелких частиц из грунтовой призмы предусмотрено укрепление откосов матрасами Рено. С целью сокращения длины металлической гофрированной конструкции, а также предотвращения проникновения воды в грунтовую призму, оголовки водопропускного сооружения оформлены монолитными железобетонными порталами и габионными стенками. Габионные сетчатые изделия (по ГОСТ Р 52132-2003), выполненные из сетки проволочной крученой с шестиугольными ячейками, изготовленной по ГОСТ Р 51285-99, предназначенной для габионных конструкций, применяются для устройства подпорных стенок, укрепления склонов и откосов насыпей, берегоукрепления, армирования грунтов, решения экологических задач восстановления и оздоровления природных ландшафтов [10].

Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлась оценка возможности безопасного пропуска через такое водопропускное сооружение максимального расхода, проходящего по реке Таунга. В соответствии с проектным заданием, максимальный расход в реке составляет 411 м^3/с. При этом должны быть обеспечены следующие требования, принимаемые при моделировании в качестве обязательных исходных предпосылок:

1. Трубы следует считать гидравлически «короткими», т. е. длина трубы не оказывает влияния на её пропускную способность.

2. Пропуск водного потока через гофрированные трубы должен осуществляться только в безнапорном режиме, при котором входное отверстие и сжатое сечение не затоплены и на всем протяжении трубы поток имеют свободную поверхность, пропускная способность зависит только от условий на входном участке трубы.

3. Нормы [10], [11] ограничивают скорость движения воды в местах расположения коробчатых габионных конструкций, максимально допустимые скорости не должны превышать 6,0 – 6,4 м/с.

При безнапорном режиме в пределах входной части гофрированной трубы линия свободной поверхности водного потока имеет вид кривой спада от подпертой глубины (глубины на входе $h_{вх}$) до сжатого сечения. Минимальная глубина устанавливается в сжатом сечении, которое в зависимости от конструкции входного оголовка, а также формы поперечного сечения и уклона дна находится на расстоянии $(1,0 – 2,0)h_{вх}$ от входа в трубу, а глубина потока в сжатом сечении колеблется в пределах $(0,4 – 0,7)h_{вх}$.

Результаты (Results)

Лабораторное моделирование выполнялось в гидротехнической лаборатории Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Размеры экспериментальной установки определялись на основе общих принципов моделирования гидравлических явлений [12] – [15] и возможностей лабораторного оборудования. Из условий функционирования натурного сооружения следует, что определяющим критерием подобия является критерий Фруда $\mathrm{Fr} = \frac{\upsilon_{вх}}{gh_{вх}}$ ($\upsilon_{вх}$ — скорость движения воды перед входом в сооружение). Это обстоятельство и определило выбор максимально возможного линейного масштаба моделирования, принятого равным $a_l = 32$. Такая модель может быть отнесена к крупномасштабной, где выполняется условие автомодельности, и полученные данные исследований будут наиболее достоверными.

Для обеспечения подобия модели и натуры по Фруду необходимо также учесть следующие масштабные коэффициенты:

– масштаб скорости: $a_\upsilon = \sqrt{a_l} = 5{,}66$;

– масштаб времени: $a_t = \dfrac{a_l}{a_\upsilon} = 5{,}66$;

– масштаб расхода воды: $a_Q = a_l^{5/2} = 5\,792{,}62$.

Модель сооружения «ПК 15 + 53» была размещена в большом гидравлическом лотке гидротехнической лаборатории, имеющем следующие характеристики: длина лотка — 40 м, ширина — 2 м, высота — 1 м, максимальный расход воды — до 120 л/с. Лоток снабжен головным устройством с гасителями волн и треугольным водосливом для измерения расхода. В нижней части лотка имеется наклонный поворотный щит для создания подпора. Модель размещалась равноудаленно от концов лотка, исключая их влияние.

Собственно модель сооружения собиралась на сварном каркасе из стального уголка, внутрь которого помещались три трубы из тонкого стального листа, имеющие эллиптическое сечение с полуосями, определяемыми масштабом моделирования $2a$ = 380 мм (в натуре 12152 мм); $2b$ = 244 мм (в натуре 7810 мм). Трубы устанавливались и закреплялись в эллиптических окнах, вырезанных в вертикальных стенках, выполняющих роль портала (рис. 5, *а*). В нижнюю часть труб были уложены обработанные по трафарету доски, придающие конструкции необходимую жесткость и выполняющие роль дна трубы. Для создания необходимой гофрированной внутренней поверхности труба покрывалась слоем разогретого пластилина толщиной около 5 мм, после чего пластилин раскатывался по трубе с помощью изготовленного трафаретного приспособления. Таким образом достигалась заданная структура внутренней поверхности труб, необходимая эллиптическая форма и размеры проходного сечения (рис. 5, *б*).

а)



б)



Рис. 5. Экспериментальная установка в гидравлическом лотке (*а*), фрагмент экспериментальной установки (*б*)

Основной задачей исследований являлась оценка работы водопропусков в пиковом режиме, т. е. при пропуске максимального расхода и при максимальном уровне подтопления. С учетом существенного разлива реки в такой ситуации, кривизна русла реки в верхнем бьефе не учитывалась, поток принимался осесимметричным. При малых расходах воды в реке влияние отлогого затопленного берега (см. рис. 3) может несколько искажать симметрию картины. Асимметрия русла при малых расходах с достаточной степенью приближения была смоделирована укладкой плоских грузов на дно модели в соответствующих местах (рис. 6).



Рис. 6. Вид модели со стороны верхнего бьефа

Для описания движения воды в каналах, имеющих замкнутый профиль, в задачах гидравлики используется понятие *степени наполнения* [16] – [18]: $a = \frac{h}{d}$, где h — глубина воды в замкнутом канале; d — высота свода (рис. 7).

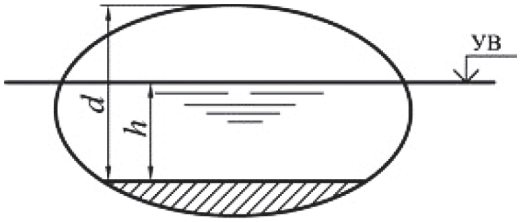


Рис. 7. Схема определения степени наполнения замкнутого канала

На практике обычно реализуется режим, при котором $a \leq 0{,}75$, что для модели определило глубину потока в 145 мм (в натуре — 4,64 м). Таким образом, в процессе лабораторных гидравлических исследований необходимо было подтвердить способность искусственного водопропускного сооружения пропускать максимальные расходы при различных уровнях воды в верхнем бьефе без превышения допустимой степени наполнения замкнутого профиля (0,75) и без подтопления нижнего бьефа. В процессе исследований необходимо было измерять расходы воды в русле, глубины потока на входе в сооружение и непосредственно за ним в нижнем бьефе, а также скорости потока в характерных точках.

Расход воды в русле определялся по треугольному водосливу, расположенному в головной части гидравлического лотка (рис. 8). Отметки поверхностей течения в русле перед сооружением и за ним определялись с помощью мерных игл (шпиценмасштабов) — рис. 9. Для измерения горизонтальных составляющих скоростей применялась микровертушка фирмы «Schitknecht» типа MicroWater6 (Германия), которая подключалась к одному из каналов информационно-измерительного комплекса на базе панельного компьютера (рис. 10). Пределы измерений микровертушкой скоростей потока — 0,04 – 5,0 м/с, погрешность измерения — 5 %.

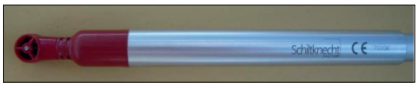


Рис. 8. Треугольный водослив в головной части лотка для определения расхода



Рис. 9. Измерение отметок свободной поверхности шпиценмасштабом

а)



б)



в)

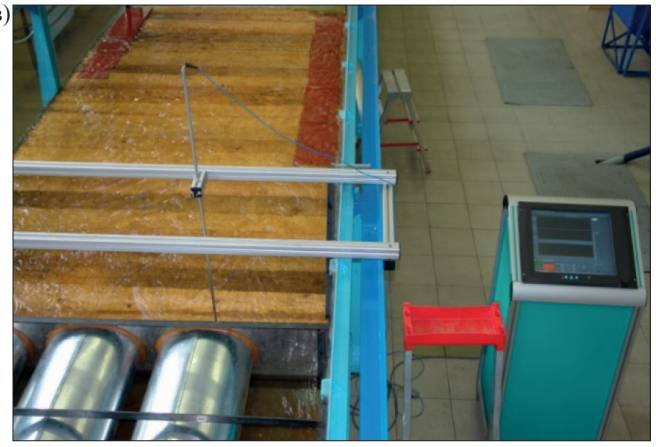


Рис. 10. Комплекс для измерения скоростей потока:
а — микровертушка фирмы Schitknecht типа MicroWater6; *б* — панельный компьютер;
в — измерительный комплекс на базе панельного компьютера

Поскольку на выходе из сооружения наблюдались четко выраженные подтопленные струи, для определения характера распределения скоростей в нижнем бьефе и нахождения максимальных значений скорости была выполнена последовательность промеров в различных областях нижнего бьефа и определены наиболее характерные точки с наибольшими скоростями. Далее производились измерения максимальных скоростей в этих точках. Схема расположения контрольных точек представлена на рис. 11. В соответствии с программой были выполнены следующие лабораторные исследования:

1. Определение пропускной способности сооружения при максимально возможном расходе Q = 411 м^3/с (для модели — 0,0709 м^3/с = 70,9 л/с) без подтопления нижнего бьефа. При этом фиксировались глубины перед сооружением и непосредственно за ним. Определялись максимальные значения скоростей потока в характерных точках нижнего бьефа.

2. Определение влияния подтопления нижнего бьефа на пропускную способность сооружения и изменение поля скоростей. Устанавливалось максимальное подтопление.

3. Определение расхода, соответствующего максимально возможному уровню воды в русле перед сооружением. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

4. Определение расхода, соответствующего уровню воды перед сооружением, равному 80 % от максимально возможного. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

5. Определение расхода, соответствующего уровню воды перед сооружением, равному 60 % от максимально возможного. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

6. Определение уровня воды перед сооружением (подпор верхнего бьефа) при глубине в нижнем бьефе, соответствующей максимально возможному в русле. Измерение скоростей течения в выбранных точках.

а) б)

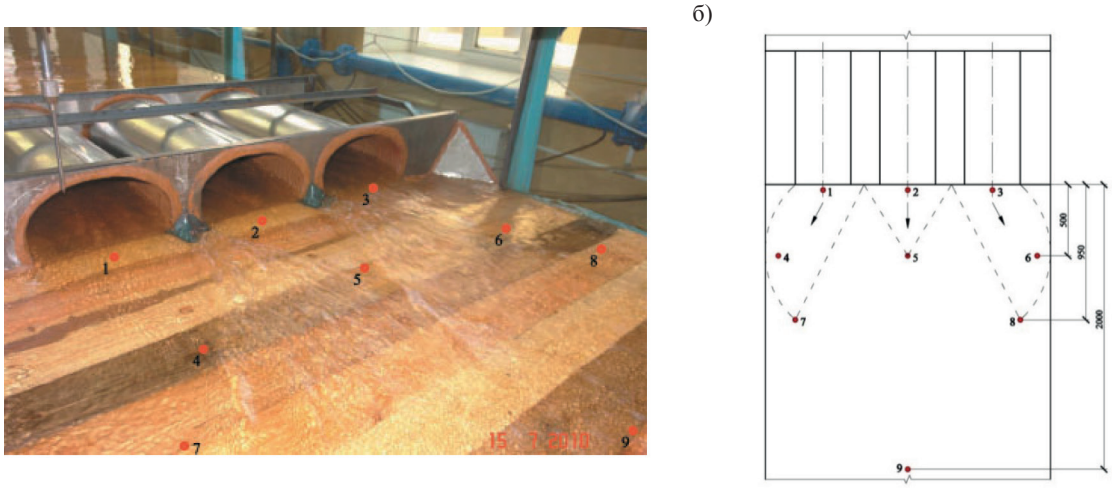


Рис. 11. Места расположения контрольных точек в нижнем бьефе с максимальными скоростями потока: *а* — фотография; *б* — схема

Максимально возможный уровень воды в русле определялся как уровень 1 %-й обеспеченности. Согласно исходным данным проекта, это отметка в натурном рельефе 604,19 м, что соответствует глубине потока в районе расположения сооружения 2,95 м (на модели — 92,0 мм).

Обсуждение (Discussion)

Результаты лабораторных исследований показали следующее (далее приводятся результаты, полученные на модели, а в скобках — пересчет на натурные условия).

1. Максимальный расход $Q = 0{,}071$ м^3/с (411 м^3/с), без подтопления нижнего бьефа (рис. 12, *а*).

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ} = 124{,}0$ мм (3,97 м);

– глубина нижнего бьефа — $h_{НБ} = 40{,}0$ мм (1,28 м);

– глубина на выходе из трубы — $h_{вых} = 75{,}0$ мм (2,40 м).

Степень наполнения в трубопроводе оказалась равной $a = 0{,}64$, что меньше допустимого значения 0,75.

Глубина перед сооружением превысила максимальный уровень 92,0 мм (2,95 м), что вполне объяснимо, так как устройство в русле реки дополнительной преграды (автомобильного моста с водопропуском) приводит к подпору и повышению уровня верхнего бьефа.

Тем не менее в этом случае сооружение обеспечивает пропуск заданного расхода. Значения скоростей, измеренных в характерных точках, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $\upsilon_{мод}$, м/с	Скорость натурного объекта $\upsilon_{нат}$, м/с
1	0,67	3,79
2	0,68	3,85
3	0,71	4,02
4	0,82	4,64
5	0,80	4,53
6	0,82	4,64
7	0,80	4,53
8	0,80	4,53
9	0,67	3,79

2. Расход Q = 0,071 м³/с (411 м³/с), подтопление нижнего бьефа — максимальное (рис. 12, *б*).

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ}$ = 170,0 мм (5,44 м);

– глубина нижнего бьефа — $h_{НБ}$ = 150,0 мм (4,80 м).

Степень наполнения a = 0,88, что больше допустимого значения — 0,75. В этом случае сооружение пропускает заданный расход, но с превышением допустимой степени наполнения (a = 0,88 > 0,75). Однако следует отметить, что данный режим представлял интерес лишь с точки зрения оценки влияния подтопления нижнего бьефа на величину максимальных скоростей. Установленное в эксперименте подтопление превышает реально возможную максимальную отметку нижнего бьефа 2,95 м.

Измеренные скорости при данном режиме существенно снизились, наибольшими из них оказались скорости в контрольной точке *2* — $\upsilon_{мод}$ = 0,40 м/с (на натуре — 2,26 м/с) и в контрольной точке *5* — $\upsilon_{мод}$ = 0,35 м/с (на натуре — 1,98 м/с).

3. Уровень воды перед сооружением — максимально возможный 92,0 мм (2,95 м), без подпора (рис. 12, *в*). Необходимо оценить расход.

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ}$ = 92,0 мм (2,95 м);

– глубина на выходе из трубы — $h_{вых}$ = 55,0 мм (1,76 м).

Измеренный расход оказался равным Q = 0,040 м³/с (232 м³/с).

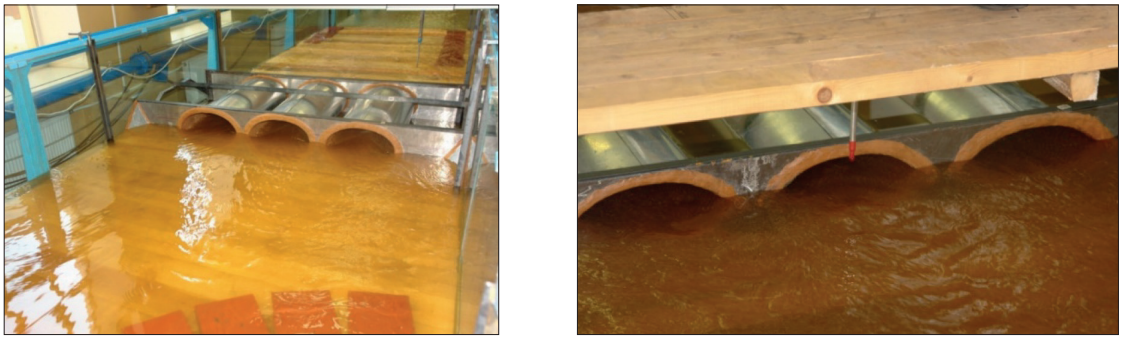
Значения максимальных скоростей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $\upsilon_{мод}$, м/с	Скорость натурного объекта $\upsilon_{нат}$, м/с
4	0,67	3,79
5	0,67	3,79
6	0,67	3,79

а) б)



в)



Рис. 12. Вид установившегося потока воды:
а — со стороны верхнего бьефа при максимальном расходе без подтопления нижнего бьефа;
б — со стороны нижнего бьефа при максимальном его подтоплении;
в — со стороны нижнего бьефа при максимально возможном уровне перед сооружением, но без подпора

4. Уровень воды перед сооружением — 80 % от максимально возможного, без подпора.

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ}$ = 74,0 мм (2,37 м);

– глубина на выходе из трубы — $h_{вых}$ = 46,0 мм (1,47 м).

Измеренный расход Q = 0,029 м^3/с (168 м^3/с).

Значения максимальных скоростей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели, $\upsilon_{мод}$, м/с	Скорость натурного объекта, $\upsilon_{нат}$, м/с
4	0,61	3,45
5	0,64	3,62
6	0,58	3,28

5. Уровень воды перед сооружением — 60 % от максимально возможного, без подпора.

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ}$ = 55,0 мм (1,76 м);

– глубина на выходе из трубы — $h_{вых}$ = 37,0 мм (1,18 м).

Измеренный расход Q = 0,018 м^3/с (104 м^3/с).

Значения максимальных скоростей даны в табл. 4.

Таблица 4

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $\upsilon_{мод}$, м/с	Скорость натурного объекта $\upsilon_{нат}$, м/с
4	0,47	2,66
5	0,48	2,72
6	0,52	2,94

6. Глубина в нижнем бьефе соответствует максимально возможной в русле.

Такое подтопление сооружения соответствует максимальному в натуре, т. е. при заданном расходе Q = 0,071 м^3/с (411 м^3/с) будет наибольшая степень наполнения a.

Результаты:

– глубина верхнего бьефа (на входе в сооружение) — $h_{ВБ}$ = 131,0 мм (4,19 м);

– глубина нижнего бьефа — $h_{НБ}$ = 92,0 мм (2,95 м);

– глубина на выходе из трубы — $h_{вых}$ = 87,0 мм (2,78 м).

Степень наполнения оказалась равной a = 0,675 < 0,75.

Скорости в контрольных точках приведены в табл. 5.

Таблица 5

Скорости в характерных точках нижнего бьефа

Номер контрольной точки	Скорость на модели $\upsilon_{мод}$, м/с	Скорость натурного объекта $\upsilon_{нат}$, м/с
1	0,58	3,28
2	0,60	3,39
3	0,60	3,39
4	0,53	3,00
5	0,55	3,11
6	0,53	3,00

Выводы (Conclusions)

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Водопропускные галереи сооружения «ПК 15+53» обеспечивают пропуск заданного пикового расхода в любых возможных режимах при допустимой степени наполнения.

2. Подпор (увеличение глубины потока) в нижнем бьефе сооружения, как и следовало ожидать, приводит к увеличению степени наполнения трубопровода. Однако с учетом того, что мак-

симальный уровень нижнего бьефа не может превысить величину уровня 1 % обеспеченности (2,95 м в натурных условиях), степень наполнения остается в допустимых пределах (< 0,75), т. е. пропускная способность сооружения обеспечивается при любом возможном в натуре подпоре.

3. Измеренные скорости потока оценивались с точки зрения влияния потока на устойчивость габионных конструкций. Полученные в результате исследования значения скоростей потока находились в пределах 0,35 – 0,82 м/с (1,98 – 4,64 м/с для натурных условий). Ведомственные строительные нормы [10, п. 5.4.2] дают следующие значения: предельная скорость потока для коробчатых габионов высотой 0,5 – 1,0 м при среднем диаметре камня заполнения 190 мм равна 6,4 м/с. В пособии по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений [11] указана предельная скорость течения воды до 6,0 м/с. Максимальная скорость потока, зафиксированная в процессе гидравлических исследований в пиковом режиме, в пересчете на натурные условия составила 4,64 м/с. Таким образом, можно сделать вывод об устойчивости габионных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алтунин В. И.* Водопропускные трубы в транспортном строительстве. Гидравлическая работа труб из металлических гофрированных структур / В. И. Алтунин, О. Н. Черных, М. В. Федотов. — М.: МАДИ, 2012. — 240 с.

2. *Алтунин В. И.* О гидравлическом режиме дорожных водопропускных труб из гофрированного металла / В. И. Алтунин, О. Н. Черных // Дороги и мосты. — 2015. — Т. 1. — № 33. — С. 234–247.

3. *Алтунин В. И.* Экспериментальные исследования металлической гофрированной водопропускной трубы при частично-напорном режиме/ В. И. Алтунин, О. Н. Черных, А. В. Бурлаченко // Приволжский научный журнал. — 2015. — № 1 (33). — С. 28–36.

4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. — М., 2011. — 341 с.

5. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). — М.: ПКТИтрансстрой, 1992.

6. Пособие по гидравлическим расчётам малых мостов и водопропускных труб на железных и автомобильных дорогах / под общ. ред. Г. Я. Волченкова. — М.: Транспорт, 1992. — 204 с.

7. Методические рекомендации по применению металлических гофрированных труб: отраслевой дорожный метод. док. / Утв. Распоряжением Росавтодора № ОС-542-р от 17.06.2002 г.

8. Методические рекомендации по применению металлических труб большого диаметра в условиях наледеобразования и многолетнемерзлых грунтов (для опытно-экспериментального строительства): отраслевой дорожный метод. док.; введ. в действие распоряжением Минтранса России от 25 августа 2003 г. № ОС-753-р. — М., 2003.

9. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон). — М.: Информавтодор, 2009. — 201 с.

10. Ведомственные строительные нормы ВСН-АПК 2.30.05.001-2003. Мелиорация. Руководство по защите земель, нарушенных водной эрозией. Габионные конструкции противоэрозионных сооружений. — М., 2003. — 29 с.

11. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений. ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИС). — М.: Транспорт, 1992. — 408 с.

12. *Леви И. И.* Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. — Л.: Энергия, 1967. — 236 с.

13. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. — 10-е изд., доп. — М.: Наука, 1987. — 432 с.

14. *Зуев К. И.* Основы теории подобия / К. И. Зуев. — Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2011. — 51 с.

15. *Иванов И. Е.* Методы подобия физических процессов / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. — М.: МАДИ, 2015. — 144 с.

16. *Чугаев Р. Р.* Гидравлика / Р. Р. Чугаев. — 4-е изд. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 672 с.

17. *Моргунов К. П.* Гидравлика / К. П. Моргунов. — СПб.: Изд-во «Лань», 2014. — 288 с.

18. *Штеренлихт Д. В.* Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. — 5-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2015. — 656 с.

REFERENCES

1. Altunin, V. I., O.N. Chernykh, and M.V. Fedotov. *Vodopropusknye truby v transportnom stroitel'stve. Gidravlicheskaya rabota trub iz metallicheskikh gofrirovannykh struktur.* M.: MADI, 2012.

2. Altunin, V.I., and O.N. Chernykh. "O gidravlicheskom rezhime dorozhnykh vodopropusknykh trub iz gofri-rovannogo metalla." *Dorogi i mosty* 1.33 (2015): 234–247.

3. Chernykh, Olʹga Nikolaevna, Vladimir Ilich Altunin, and Alyona Vladimirovna Burlachenko. "Experimental investigation of corrugated metal pipe with partly full flow." *The Privolzhsky Scientific Journal* 1(33) (2015): 28–36.

4. Russian Federation. Set of Rules SP 35.13330.2011 «Mosty i truby». Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03-84. M., 2011.

5. *SNIP 2.05.03-84 "Bridges and Underpasses" Handbook on Surveying and Design of Railroad and Road Bridge Crossings of Streams*. M.: PKTItransstroi, 1992.

6. Volchenkov, G.Ya. *Posobie po gidravlicheskim raschetam malykh mostov i vodopropusknykh trub na zheleznykh i avtomobil'nykh dorogakh*. M.: Transport, 1992.

7. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu metallicheskikh gofrirovannykh trub. Otraslevoi dorozhnyi metodicheskii document*. Utverzhden rasporyazheniem Rosavtodora № OS-542-r ot 17.06.2002 g.

8. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu metallicheskikh trub bol'shogo diametra v usloviyakh naledeobrazovaniya i mnogoletnemerzlykh gruntov (dlya opytno-eksperimental'nogo stroitel'stva). Otraslevoi dorozhnyi metodicheskii dokument*. M., 2003.

9. Russian Federation. Branch road methodical document ODM 218.2.001-2009. Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu vodopropusknykh sooruzhenii iz metallicheskikh gofrirovannykh struktur na avtomobil'nykh dorogakh obshchego pol'zovaniya s uchetom regional'nykh uslovii (dorozhno-klimaticheskikh zon). M.: Informavtodor, 2009.

10. Russian Federation. Departmental building norms VSN-APK 2.30.05.001-2003. Melioratsiya. Rukovodstvo po zashchite zemel', narushennykh vodnoi eroziei. Gabionnye konstruktsii protivoerozionnykh sooruzhenii. M., 2003.

11. *Posobie po gidravlicheskim raschetam malykh vodopropusknykh sooruzhenii. VNII transportnogo stroitel'stva (TsNIIS)*. M.: Transport, 1992.

12. Levi, I.I. *Modelirovanie gidravlicheskikh yavlenii*. L.: Energiya, 1967.

13. Sedov, L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike*. 10th ed. M.: Nauka, 1987.

14. Zuev, K.I. *Osnovy teorii podobiya*. Vladimir: Izd-vo Vladimirskogo gos. un-ta, 2011.

15. Ivanov, I.E., and V.E. Ereshchenko. *Metody podobiya fizicheskikh protsessov.* M.: MADI, 2015.

16. Chugaev, R.R. *Gidravlika*. 4th ed. L.: Energoizdat, 1982.

17. Morgunov, K.P. *Gidravlika*. SPb.: Izd-vo «Lan'», 2014.

18. Shterenlikht, D.V. *Gidravlika*. 5th ed. SPb.: Izd-vo «Lan'», 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивановский Юрий Кириллович — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf _gsk@gumrf.ru*

Моргунов Константин Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *morgunovkp@gumrf.ru*

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanovskiy, Yuri K. — associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf _gsk@gumrf.ru*

Morgunov, Konstantin P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *morgunovkp@gumrf.ru*

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

Статья поступила в редакцию 24 января 2018 г.
Received: January 24, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-331-337

WATER QUALITY COASTAL ZONE OF THE GULF OF FINLAND IN 2016 – 2017

N. I. Doroshenko[1,2], D. M. Belov[2], V. E. Kriyt[3]

[1] — Ltd "Saint-Petersburg Ecology", St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[3] — Ltd "LenStroyGeology", St. Petersburg, Russian Federation

A laboratory study of the natural waters of the Gulf of Finland near the coastal zones of the main large beaches of the southern coast on the content of pollutants was conducted to identify the main pollutants exceeding the maximum permissible concentrations in the waters of the southern coast of the Gulf of Finland, the allocation of sources of these substances and describe the prospects for bringing these indicators to regulatory concentrations. Laboratory tests were carried out at 4 points: the first point was taken in the dam near the village of Martyshkino, the second is taken in the coastal zone of the beach of the village of Bolshaya Izhora, the third in the beach area, the former pier fish factory, the fourth was taken in the coastal zone of the beach of Sosnovy Bor. The results of laboratory research on presence of polluting substances of natural waters of the coastal zone of the Gulf of Finland are given. The results of the study of water quality at these points showed how and what human activity affects the chemical composition of the natural waters of the Gulf of Finland within the boundaries of the southern coast. A comparative analysis of the results of the study of the waters of the Gulf of Finland, given the statistics of exceedances for 2016 – 2017. Bringing these substances to the standards of maximum permissible concentrations will give the necessary water quality in the Gulf of Finland, suitable for recreational purposes, including swimming and fishing. A description was given of the main sources that contribute these pollutants to the waters of the Gulf of Finland. The article describes the main problems, the solution of which is necessary to bring the quality of the Gulf of Finland to the normative. The article also describes background, natural pollution peculiar to St. Petersburg and the Leningrad region, reduction of which to the standards established by the law is impossible in consequence of the specifics of the composing soils of this area.

Keywords: natural waters pollution, southern coast, Finland Gulf, chemical composition, coastal zone, recreational purposes.

For citation:
Doroshenko, Nadezhda I., Daniil M. Belov, and Vladimir E. Kriyt. "Water quality coastal zone of the Gulf of Finland in 2016-2017." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 331–337. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-331-337.

УДК 504.4.054

КАЧЕСТВО ВОД БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В 2016 – 2017 ГГ.

Н. И. Дорошенко[1, 2], Д. М. Белов[2], В. Е. Крийт[3]

[1] — ООО «Санкт-Петербург Экология», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3] — ООО «ЛенСтройГеология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведено исследование на содержание загрязняющих веществ природных вод Финского залива в районе береговых зон основных крупных пляжей южного побережья с целью выделения основных загрязняющих веществ, дающих превышение по предельно допустимым концентрациям, выделения источников данных веществ и описания перспективы доведения данных показателей до нормативных концентраций. Лабораторные исследования были проведены в четырех точках: первая точка — в черте дамбы в районе населенного пункта Мартышкино, вторая — в береговой зоне пляжа поселка Большая Ижора, третья — в районе пляжа и бывшего причала рыбного завода, четвертая — в береговой зоне пляжа г. Сосновый бор. Результаты исследований качества вод на данных точках показали, как и какой род деятельности человека воздействует на химический состав природных вод. Проведен сравнительный анализ результатов исследования вод Фин-

ского залива, дана статистика превышений за 2016 – 2017 гг. Приведение этих веществ к нормативам предельно допустимых концентраций даст необходимое качество вод в Финском заливе, пригодное для рекреационных целей, в том числе купания и рыбалки. Дано описание основных источников, вносящих загрязняющие вещества в воды Финского залива. Описаны основные проблемы, решение которых необходимо для доведения качества вод Финского залива до нормативных. В статье также описаны фоновые природные загрязнения, свойственные для Санкт-Петербурга и Ленинградской области, приведение которых к установленным законом нормативам невозможно вследствие специфики слагающих почв данного района.

Ключевые слова: загрязнение природных вод, южное побережье, Финский залив, химический состав, береговая зона, рекреационные цели.

Для цитирования:
Дорошенко Н. И. Качество вод береговой зоны Финского залива в 2016 – 2017 гг. / Н. И. Дорошенко, Д. М. Белов, В. Е. Крийт // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 331–337. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-331-337.

Введение (Introduction)

Акватория Санкт-Петербурга подвержена сбросам сточных промышленных и бытовых вод от многочисленных заводов, портов и объектов селитьбы, вследствие чего в воды Финского залива постоянно вносятся загрязняющие вещества не только с прилегающих к акватории промышленных объектов, но также из притоков Невы, непосредственно самой Невы и с донных отложений в ее акватории. В связи с этим возникает проблема мониторинга состояния качества вод Финского залива, а также поиск источников загрязнения по показателям, статистически чаще всего превышающим установленные предельно допустимые концентрации. Основными источниками сброса сточных вод на южном побережье Финского залива являются следующие объекты: порт «Бронка», Юго-Западные очистные сооружения, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», очистные сооружения бытового стока, жилые дома, коттеджи, а также (западнее дамбы) два крупных предприятия: атомная электростанция г. Сосновый Бор и морской порт, расположенный вблизи Усть-Луги. Этими объектами и обусловлены основные антропогенные загрязняющие вещества, присутствующие в водах Финского залива на определенных участках.

Во исполнение Федерального закона № 7 «Об охране окружающей среды» [1] ФГБУ «Северо-западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее — Гидрометцентр) на ежемесячной основе выполняет и публикует данные о гидрохимической съемке акватории Невской губы на станциях сети ГСН [2]. Так как оценка качества природных вод Гидрометцентром производится только в пределах Невской губы, информация о состоянии водного объекта западнее дамбы отсутствует. Имеются данные исследований северного побережья Финского залива [3], [4], Невской губы [5], а также данные ряда иностранных журналов, описывающих химическое загрязнение вод Балтийского моря ПХБ (полихлорированные бифенилы) и ДДТ (дихлордифенил трихлорметилметан) [6], загрязнение донных осадков [7], наличие органогалогенных токсикантов в рыбе Финского залива [8], содержание эвтрофикантов в водах Финского залива [9]. Тем не менее эти исследования не показывают содержание химических загрязнителей, таких как железо, медь, нефтепродукты на южном побережье Финского залива.

Таким образом, целью исследования, выполненного в данной статье, стали воды южного побережья Финского залива, западнее дамбы. Исследование позволило определить гидрохимическое состояние качества вод Финского залива на его южном побережье. Для этого необходимо было отобрать и исследовать дополнительные пробы природных вод в районе основных пляжей западнее дамбы, а также одну сравнительную пробу в границах Невской губы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

20 ноября 2017 г. авторами были взяты и проанализированы дополнительные пробы в районе основных пляжей [10]. Первая проба была взята в черте дамбы в районе населенного пункта Мартышкино, вторая — в береговой зоне пляжа поселка Большая Ижора, третья — отобрана в районе

пляжа, бывшего причала рыбного завода, четвертая — в береговой зоне пляжа г. Сосновый Бор. Исследования проводились в испытательном лабораторном центре «ЛенСтройГеология». Для измерений использовались приборы, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Приборы, использованные для измерения качества природных вод Финского залива

№ п/п.	Наименование прибора	Заводской номер	Номер свидетельства, срок очередной поверки
1	Анализатор жидкости «Флюорат-02»	7056	0172369, 02.11.2018
2	Спектрометр оптический эмиссионный с индуктивно связанной плазмой ICPE-9000	B41845201187	242/2903-2017, 15.05.2018
3	Спектрофотометр ПЭ5300ВИ	53ВИ1256	0160062, 16.10.2018

Результаты (Results)

Были проведены лабораторные исследования проб следующих показателей: определено в воде сульфатов, нефтепродуктов, железа, цинка, никеля, меди, марганца. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования проб воды Финского залива

Определяемый показатель, мг/дм^3	Номер пробы				НД на метод анализа
	1	2	3	4	
Железо (общ.)	0,68	0,14	0,12	0,065	ГОСТ 31870-2012
Медь	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
Марганец	0,066	1,4	0,26	0,069	
Никель	0,005	0,007	0,008	0,006	
Цинк	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	
Сульфаты	57	117	86	125	ГОСТ 31940-2012
Нефтепродукты	5,3	1,4	0,49	0,19	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98

Согласно данным Гидрометцентра [2], в ноябре 2017 г. гидрохимические съёмки в акватории Невской губы проводились на станциях сети Глобальной системы наблюдений (далее ГСН), представленных на рис. 1. В ноябре 2017 г. случаев высокого и экстремально высокого загрязнений в водах Невской губы станциями сети ГСН зарегистрировано не было.

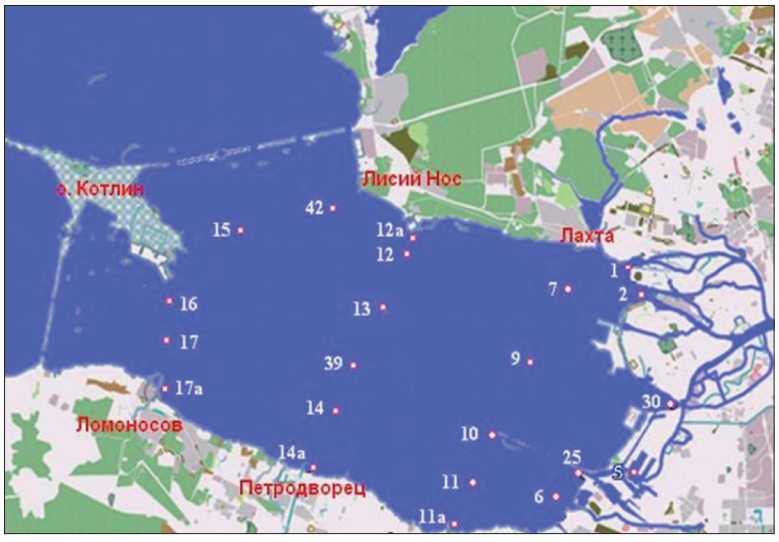


Рис. 1. Расположение станций сети ГСН в Невской губе

Содержание растворенного кислорода, фосфатов по фосфору, азота нитратного и аммонийного, а также водородного показателя pH находилось в пределах нормы. В четырех пробах было зафиксировано превышение установленных нормативов по содержанию азота нитритного (ПДК = 20 мкг/дм^3), максимальная концентрация (1,8 ПДК) была зафиксирована на ст. 42, в поверхностном горизонте. В трех пробах наблюдалась концентрация легкоокисляемых органических веществ (по $БПК_5$) выше установленного норматива, максимум наблюдался в районе ст. 39 в придонном горизонте и превысил ПДК в 1,4 раза (ПДК = 2 мг O_2/дм^3). Содержание нефтепродуктов и фенолов не превышало допустимый уровень во всех отобранных пробах. Согласно анализу проб на содержание тяжелых металлов, в водах Невской губы в ноябре 2017 г. отмечались превышения допустимых значений по таким показателям, как медь, железо общее, марганец, цинк и алюминий. На рис. 2 представлено процентное соотношение показателей качества вод, по которым в ноябре 2017 г., по данным Гидрометцентра, наблюдалось нарушение установленных нормативов.

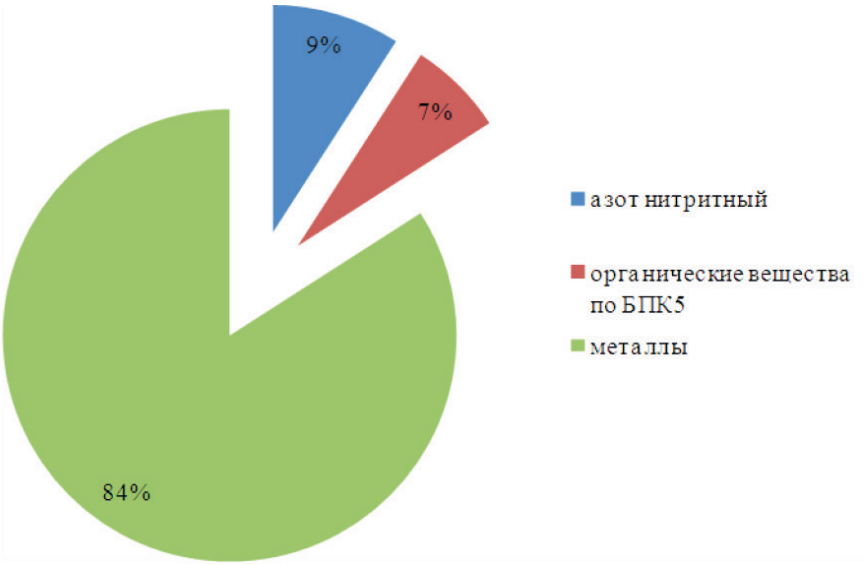


Рис. 2. Процентное соотношение показателей качества вод, превышающих нормативы в водах Невской губы в ноябре 2017 г. (по данным Гидрометцентра)

Согласно годовым отчетам Гидрометцентра за 2016 и 2017 гг. [2], основными загрязняющими веществами, превышающими допустимые уровни, в водах Невской губы являются:

1) тяжелые металлы 73,4 — 74 %, из них железо 74,8 — 89 %; медь 23,5 — 6 %;
2) органические вещества по БПК5 (14,3 — 12 %);
3) азот нитритный (10,6 — 11 %);
4) азот аммонийный (1,5 — 2 %);
5) нефтепродукты (0,2 — 1 %).

Обсуждение (Discussion)

На основании полученных результатов лабораторных исследований и статистики гидрохимической съемки Гидрометцентра, а также других исследований, выполненных в водах Финского залива [11], можно определить, что основными загрязняющими веществами, оказывающими влияние на использование береговой зоны Финского залива для рекреационных целей, являются железо, азот и нефтепродукты.

Повышенное содержание железа свойственно для вод Санкт-Петербурга, так как его много в почвах региона. В некоторых районах Ленинградской области концентрация железа в подземных водах достигает уровня 25 мг/л и более [12]. Учитывая высокие природные концентрации, железо в водах Финского залива нельзя считать коньюгантом, и превышение предельно допустимых концентраций данного элемента в водах следует расценивать, скорее, как фон, нежели загрязнение водоема.

Соединения азота — это, прежде всего, продукты метаболизма человека и животных. К сожалению, из-за неполного канализирования нашего города, и отсутствия в нем раздельной системы канализации бытовых и ливневых вод (и как следствие — более сложной и не всегда полной очистки сточных вод), а также наличия жилого сектора с отсутствующим канализированием, превышение содержания соединений азота в водах Финского залива является вполне логичным [13]. Для улучшения качества вод по данным показателям городу и области необходима целая программа по канализированию и водоочистке. До тех пор, пока не все сточные воды проходят очистку на городских или локальных очистных сооружениях, улучшение качества вод в Финском заливе по данному показателю не представляется возможным.

Последниим и, по мнению авторов, главным компонентом в списке превышений являются нефтепродукты. Именно содержание нефтепродуктов не только превысило допустимые концентрации, но и в точке отбора в районе населенного пункта Мартышкино, т. е. в границах дамбы, соответствуют значениям, более чем в два раза превышающим концентрацию «высокого загрязнения» (концентрация в пробе 5,3 мг/л, ПДК = 0,05 мг/л, высокое загрязнение — 2,5 мг/л). Такая высокая концентрация объясняется не только наличием в черте города огромного количества автотранспорта, но и наличием основных загрязнителей данным веществом — портов. В непосредственной близости береговой зоны населенного пункта Мартышкино находится порт «Бронка».

Заключение (Conclusion)

Для использования береговой зоны Финского залива для рекреационных целей, прежде всего, необходимо уменьшить поступление нефтепродуктов с судов и очистных станций. На сегодняшний день допустимая концентрация нефтепродуктов для сброса льяльных вод составляет 10 мг/л. Таким образом, чтобы улучшить состояние Финского залива по показателю «нефтепродукты», необходимо не только на законодательном уровне ограничить поступление не очищенных до уровня ПДК рыбохозяйственного водоема вод в границах города и области, но и обеспечить места сбора и очистки данных вод на береговых станциях [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ.

2. Официальный сайт ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.meteo.nw.ru/ (дата обращения: 06.12.2017).

3. *Шишкин А. И.* Комплексная гидрохимическая и гидробиологическая оценка качества водных объектов бассейна северной части Финского залива / А. И. Шишкин [и др.] // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. матер. Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции: в 3 т. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. — С. 481–484.

4. *Строганова М. С.* Интегральная оценка качества воды водных объектов северо-восточной части Финского залива / М. С. Строганова, А. И. Шишкин // Междунар. науч. экологическая конф. стран балтийского региона «ЭКОБАЛТИКА»: сб. тр. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. — № 1. — С. 57–61.

5. *Балушкина Е. В.* Изменение качества воды и биоразнообразия сообществ донных животных в эстуарии р. Невы под влиянием антропогенного стресса / Е. В. Балушкина, С. М. Голубков // Региональная экология. — 2017. — № 2 (48). — С. 5–17.

6. *Lehtonen K. K.* Chemical pollution and ecotoxicology / K. K. Lehtonen, A. Bignert, C. Bradshaw, K. Broeg, D. Schiedek // Biological Oceanography of the Baltic Sea. — Springer, Dordrecht, 2017. — Pp. 547–587. DOI: 10.1007/978-94-007-0668-2_16.

7. *Vallius H.* Quality of the surface sediments of the northern coast of the Gulf of Finland, Baltic Sea / H. Vallius // Marine pollution bulletin. — 2015. — Vol. 99. — Is. 1–2. — Pp. 250–255. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.070.

8. *Vuorinen P. J.* Review of organohalogen toxicants in fish from the Gulf of Finland / P. J. Vuorinen, O. Roots, M. Keinänen // Journal of Marine Systems. — 2017. — Vol. 171. — Pp. 141–150. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.002.

9. *Knuuttila S.* Nutrient inputs into the Gulf of Finland: Trends and water protection targets / S. Knuuttila, A. Räike, P. Ekholm, S. Kondratyev // Journal of Marine Systems. — 2017. — Vol. 171. — Pp. 54–64. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.09.008.

10. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. — Ростов н/Д: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. — 36 с.

11. *Gubelit Y.* Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: sediments, macroalgae, microbiota / Y. Gubelit, Y. Polyak, G. Dembska, G. Pazikowska-Sapota, L. Zegarowski, D. Kochura, D. Krivorotov, E. Podgornaya, O. Burova, C. Maazouzi // Science of the Total Environment. — 2016. — Vol. 550. — Pp. 806–819. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.122.

12. *Дорошенко Н. И.* Повышение эффективности седиментационной очистки ливневых сточных вод от железа / Н. И. Дорошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 69–74.

13. *Афанасьев Г. Ю.* Невская вода и загрязнения большого города: к вопросу об экологических аспектах истории Санкт-Петербурга конца XIX – начала XX веков / Г. Ю. Афанасьев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. — 2015. — № 4 (232). — С. 40–47. DOI: 10.5862/JHSS.232.5.

14. *Решняк В. И.* Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: монография / В. И. Решняк. — СПб.: Изд-во СПБГУВК, 2011. — 194 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal Law N 7-FZ “Ob okhrane okruzhayushchei sredy” from 10 Jan. 2002.

2. Ofitsial’nyi sait FGBU «Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i mo-nitoringu okruzhayushchei sredy». Web. 6 Dec. 2017 <http://www.meteo.nw.ru/>.

3. Shishkin, A.I., M.S. Stroganova, I.A. Ivanova, and V.V. Ivanova. “Complex hydrochemical and hydrobiological assessment of water bodies of the northern part Gulf of Finland.” *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, priurochennoi k 145-letiyu Sevastopol’skoi biologicheskoi stantsii: v 3 tomakh*. Sevastopol’: EKOSI-Gidrofizika, 2016. 481–484.

4. Stroganova, M.S., and A.I. Shishkin. “Integrated assessment water quality of water bodies of the Finland Gulf northeast part.” *International science environmental conference of Baltic region countries “ECOBALTICA”. Book of Proceedings*. No 1. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2017. 62–66.

5. Balushkina, E.V., and S.M. Golubkov. “Change in the water quality and biodiversity of benthic animal communities in the Neva estuary under anthropogenic stress.” *Regional’naya ekologiya* 2(48) (2017): 5–17

6. Lehtonen, Kari K., Anders Bignert, Clare Bradshaw, Katja Broeg, and Doris Schiedek. “Chemical pollution and ecotoxicology.” *Biological oceanography of the Baltic Sea*. Springer, Dordrecht, 2017. 547–587. DOI: 10.1007/978-94-007-0668-2_16.

7. Vallius, Henry. “Quality of the surface sediments of the northern coast of the Gulf of Finland, Baltic Sea.” *Marine pollution bulletin* 99.1–2 (2015): 250–255. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.070.

8. Vuorinen, Pekka J., Ott Roots, and Marja Keinänen. “Review of organohalogen toxicants in fish from the Gulf of Finland.” *Journal of Marine Systems* 171 (2017): 141-150. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.12.002.

9. Knuuttila, Seppo, Antti Räike, Petri Ekholm, and Sergey Kondratyev. “Nutrient inputs into the Gulf of Finland: Trends and water protection targets.” *Journal of Marine Systems* 171 (2017): 54–64. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2016.09.008.

10. Russian Federation. Recommendations R 52.24.353-2012. Otbor prob poverkhnostnykh vod sushi i ochishchennykh stochnykh vod. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, FGBU «GKhI», 2012.

11. Gubelit, Yulia, Yulia Polyak, Grazyna Dembska, Grazyna Pazikowska-Sapota, Lukasz Zegarowski, Dmitry Kochura, Denis Krivorotov, Elena Podgornaya, Olga Burova, and Chafik Maazouzi. “Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: sediments, macroalgae, microbiota.” *Science of the Total Environment* 550 (2016): 806–819. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.122.

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

13. Afanasiev, Gr.Yr. "Waters of Neva and the pollution of the big city: in case of ecological problems of the St-Petersburg at the end of 19th – beginning of 20th century." *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 4(232) (2015): 40–47. DOI: 10.5862/JHSS.232.5.

14. Reshnyak, V.I. *Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchei podslanevoi vodoi pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet vodnykh kommunikatsii, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорошенко Надежда Ивановна — аспирант, руководитель отдела экологического сопровождения
Научный руководитель:
Белов Даниил Михайлович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
ООО «Санкт-Петербург Экология»
198152, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Краснопутиловская, 8
e-mail: *132620@mail.ru*

Белов Даниил Михайлович — доктор географических наук, профессор, заслуженный эколог РФ
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *olt_prts@inbox.ru*

Крийт Владимир Евгеньевич — кандидат химических наук, начальник испытательного лабораторного центра
ООО «ЛенСтройГеология»
196240, Российская Федерация, Санкт-Петербург, пл. Победы, д. 1, к. 1.
e-mail: *vladimirkriit@list.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Doroshenko, Nadezhda I. — Postgraduate, Head of Environmental Support Department
Supervisor:
Belov, Daniil M.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
Ltd "Saint-Petersburg Ecology"
8 Krasnoputilovskaya Str., St. Petersburg, 198152, Russian Federation
e-mail: *132620@mail.ru*

Belov, Daniil M. — Dr. of Geographical Sciences, professor, honored ecologist of the Russian Federation
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *olt_prts@inbox.ru*

Kriyt, Vladimir E. — PhD, Head of the Testing Laboratory Center
Ltd "LenStroyGeology",
1/1 Pobedy Square, St. Petersburg, 196240, Russian Federation
e-mail: *vladimirkriit@list.ru*

Статья поступила в редакцию 6 марта 2018 г.
Received: March 6, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-338-345

RESULTS OF RESEARCH OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE COMBINED SAND-GRAVEL MIXTURE

Ja. S. Smirnov-Tumanov[1], N. M. Panchenko[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Emperor Alexander I Saint Petersburg State transport University,
St. Petersburg, Russian Federation

The exact values of the coefficients of filtration and porosity for crushed stone and sand were separately studied and determined, but in no reference it is impossible to find the given indices for a combined gravel-sand mixture. This is important, since in real construction conditions, not the "pure" material, but its mixture, is most often used. Therefore, the research task was to study the physical and mechanical properties and mechanisms of the functioning of the combined gravel-sand mixture. As a tool for solving the problem, the Darcy instrument was chosen. The laboratory installation, by means of which the experiments were performed, was designed and assembled specially for the experiment. The description of the sequence of experiments is presented, the results obtained in the course of the experiment are presented, namely: the values of the filtration and porosity coefficients for soils with a specified percentage, and the corresponding graphical dependencies of these indices on the composition of the mixtures studied. Studies have shown that the change in the sought-for quantities is non-linear, and, depending on the percentage of the samples in question, their values are different tens of times. These characteristics and the dependencies built on them are of practical use in the construction and operation of hydraulic structures, in geotechnics, melioration and petroleum and gas industry, since they allow selecting the necessary composition of inert materials (sand and crushed stone) to ensure a given filtration factor and predict the filtration properties combined soils with known proportions. Due to the obtained results, it is possible to artificially combine the proportions of the mixtures so that the filtration coefficient of the created material is many orders of magnitude lower than that of the original ingredients alone.

Keywords: filtration coefficient, porosity, Darcy's method, combined mixture, crushed stone, sand.

For citation:
Smirnov-Tumanov, Jaroslav S., and Nataliy M. Panchenko. "Results of research of physical-mechanical properties of the combined sand-gravel mixture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 338–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-338-345.

УДК 626

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ

Я. С. Смирнов-Туманов[1], Н. М. Панченко[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Изучены и определены точные значения коэффициентов фильтрации и пористости для щебня и песка по отдельности, однако ни в одном справочнике невозможно найти данных показателей для комбинированной щебеночно-песчаной смеси. Это важно, так как в реальных условиях строительства чаще всего используется не «чистый» материал, а именно его смеси. Поэтому задачей исследования явилось изучение физико-механических свойств и механизмов функционирования комбинированной щебеночно-песчаной смеси. В качестве инструмента для решения поставленной задачи был выбран прибор Дарси. Лабораторная установка, при помощи которой выполнялись опыты, была спроектирована и собрана специально для поставленного эксперимента. В работе сделано описание последовательности проведения опытов, представлены результаты, полученные в ходе проведенного эксперимента, а именно величины

коэффициентов фильтрации и пористости для грунтов с заданным процентным соотношением и соответствующие графические зависимости данных показателей от состава изучаемых смесей. Исследования показали, что изменения искомых величин имеют нелинейный характер и в зависимости от процентного содержания рассматриваемых образцов их значения различаются в десятки раз. Данные характеристики и построенные на их основе зависимости имеют практическую пользу в строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, в геотехнике, мелиорации и нефтегазовом деле, так как позволяют выбирать необходимый состав инертных материалов (песка и щебня) для обеспечения заданного коэффициента фильтрации и прогнозировать фильтрационные свойства комбинированных грунтов с известными пропорциями. Благодаря полученным результатам, можно искусственно скомбинировать пропорции смесей таким образом, чтобы коэффициент фильтрации созданного материала был на много порядков ниже, чем у исходных ингредиентов в отдельности.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации, пористость, метод Дарси, комбинированная смесь, щебень, песок.

Для цитирования:
Смирнов-Туманов Я. С. Результаты исследования фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси / Я. С. Смирнов-Туманов, Н. М. Панченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 338–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-338-345.

Введение (Introduction)

Для проектирования, а также качественного строительства и эксплуатации грунтовых сооружений, дренажных и водопонижающих систем необходимо знать точные значения пористости и коэффициента фильтрации грунта. Кроме того, эти данные важны не только для строительной сферы, они также применяются, например, при определении дебита скважин в горной и нефтегазовой отраслях. Для песка и щебня различной крупности значения пористости и коэффициента фильтрации определены с достаточной точностью и подробно освещены в работах В. М. Гольдберга, В. А. Королева [1], [2].

В случае комбинированного грунта (смеси песка и щебня в различных пропорциях) не имеется достоверных данных, так как его фильтрационные свойства ранее изучены не были. Поэтому представленные в данном исследовании функциональные зависимости физико-механических свойств песчано-щебёночных смесей от составляющих их пропорций и выявленные в результате так называемые «особые точки» функциональных зависимостей — экстремумы, имеют практический интерес.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси осуществляется с помощью прибора Дарси. Принцип работы этого прибора заключается в использовании цилиндрического сосуда, заполненного исследуемым материалом, через который при постоянной разнице напоров пропускается вода. С помощью пьезометров определяется давление в различных по высоте сечениях испытуемого образца [3]. В процессе проведения эксперимента изменялся процентный состав смеси, измерялись показания пьезометров и определялся расход воды согласно ГОСТ 25584-90 и ГОСТ 5180-84.

Ввиду того, что режим течения жидкости в порах ламинарный, потери напора пропорциональны скорости ее движения в первой степени [4]. Эта зависимость впервые была установлена при исследованиях движения воды в песчаных фильтрах французским инженером Анри Фалибером Гаспаром Дарси и получила название *закона Дарси,* или *линейного закона фильтрации* [5].

Исторически закон был получен экспериментально, он может быть получен с помощью осреднения уравнений Навье–Стокса (1), описывающих течение в масштабе пор (в настоящее время имеются доказательства для пористых сред с периодической и случайной микроструктурой). Закон выражает зависимость скорости фильтрации флюида от градиента напора:

$$\vec{u} = -k \cdot \vec{I}, \qquad (1)$$

где $\vec{u}$ — скорость фильтрации; k — коэффициент фильтрации; $\vec{I}$ — градиент напора.

Область применения закона Дарси ограничена фильтрацией жидкости, подчиняющихся закону вязкого трения Ньютона (закону Навье–Стокса) [6], [7]. Для ньютоновских жидкостей область применения закона Дарси ограничивается малыми скоростями фильтрации, при которых кинетической энергией потока можно пренебречь. При больших скоростях зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации нелинейна (корреляцию с экспериментальными данными дает квадратичная зависимость — закон фильтрации Форхгеймера).

Лабораторная установка была спроектирована специально для проводимого эксперимента. Фильтрационная колонна состоит из пластиковой трубы диаметром 200 мм и высотой 2 м с концевой заглушкой в своей нижней части и вмонтированным в неё многооборотным вентилем. В трубу с шагом 400 мм через отверстия, снабжённые резиновым уплотнителем, установлено пять пьезометров. Пьезометры расположены так, чтобы от начала трубы до первого измерительного прибора и от конца трубы до последнего оставалось по 200 мм в качестве технологического запаса. Трубки пьезометров — это резиновые шланги диаметром 12 мм, жестко закреплённые на деревянном стенде с соблюдением прямолинейности. Передняя стенка стенда имеет масштабно-координатную сетку, позволяющую снимать натурные показания с точностью до 1 мм [8].

При помощи описанной ранее установки был проведен эксперимент, целью которого было получение функциональных зависимостей: «коэффициент фильтрации — процентное соотношение исследуемого образца», «пористость — процентное соотношение исследуемого образца» и «коэффициент фильтрации — пористость». Исследование проводилось дискретным методом с шагом 20 %. Изучению подверглись шесть типов песчано-щебёночных смесей, процентное содержание которых дано в табл. 1. Для того, чтобы изготовить смеси заданного процентного содержания, в образцы № 1 и 2 добавили песок, получив в результате образцы № 2 и 3 соответственно, а образцы № 5 и 4 были созданы из образцов № 6 и 5 путем добавления в них щебня. Так как отработанная смесь образца № 3 для дальнейшего эксперимента непригодна, необходимо использовать два комплекта опытного материала.

Таблица 1

Процентное содержание песчано-щебёночных смесей

№ п/п. смеси	Содержание щебня, %	Содержание песка, %
1	100	0
2	80	20
3	60	40
4	40	60
5	20	80
6	0	100

Для определения пористости могут применяться различные методики (например, гидростатическое взвешивание, парафинизация и др.). В данном случае использовался объемный метод как наиболее простой, бюджетный и достоверный [9]. Сущность его заключалась в следующем: мерный сосуд заполняется образцом исследуемой смеси, объём (V_c) и масса (m_c) которого известны, затем медленно, чтобы не происходило изменений структуры грунта, заполняется «до краев» водой, после чего с помощью лабораторных весов определяется вес добавленной жидкости, а затем рассчитывается её объём, который будет соответствовать объёму пор образца исследуемой смеси ($V_{пор}$). Сопоставив V_c и $V_{пор}$, можно судить о пористости опытного материала.

При определении коэффициента фильтрации выходными данными являлись показания пьезометров, полученные фотофиксацией результатов измерений в режиме реального времени, и фильтрационный расход для всех образцов, измеряемый объемным методом [10]. Под сливной вентиль подставлялась тара, заполненная песчано-щебёночной смесью нужного процентного соотношения, и с помощью секундомера определялось время её наполнения. Далее производилось взвешивание смеси на лабораторных весах, что позволило вычислить вес отобранной в течение определенного периода времени жидкости, дважды измерялась температура жидкости лабораторным термометром и рассчитывалась её плотность. Зная плотность, объем жидкости и время наполнения тары, можно определить фильтрационный расход [11].

Для каждой смеси производилось вычисление пяти вариантов коэффициента фильтрации, обусловленное следующими граничными условиями: верхняя граница — это пропускная способность питающего трубопровода, нижняя граница — это оцениваемые потери напора на пьезометрическом стенде, которые могут быть определены с учётом погрешности (1 мм — одна клетка масштабно-координатной сетки). Промежуточные значения были добавлены для получения полной картины результатов исследования, затем результат осреднялся. Кроме того, производился расчёт трех вариантов коэффициента пористости для пробы из верхней, средней и нижней частей трубы, результат также осреднялся.

Результаты (Results)

В результате проведённого эксперимента определялись значения пористости n и значения коэффициента фильтрации $k_ф$ для описанных ранее образцов щебёночно-песчаных смесей (приведены в табл. 2 и 3 соответственно) и были построены графические зависимости: «коэффициент фильтрации — процентное соотношение исследуемого образца», «пористость — процентное соотношение исследуемого образца», «коэффициент фильтрации — пористость» (представлены на рис. 1 – 3 соответственно).

Таблица 2

Определение пористости

№ п/п. смеси	Содержание щебня, %	Содержание песка, %	Пористость n
1	100	0	0,4395
2	80	20	0,3405
3	60	40	0,2217
4	40	60	0,2553
5	20	80	0,3031
6	0	100	0,3517

Таблица 3

Определение коэффициента фильтрации

№ п/п. смеси	Содержание щебня, %	Содержание песка, %	Коэффициент фильтрации $k_ф$, см/с
1	100	0	24,219
2	80	20	1,430
3	60	40	0,032
4	40	60	0,077
5	20	80	0,578
6	0	100	1,290

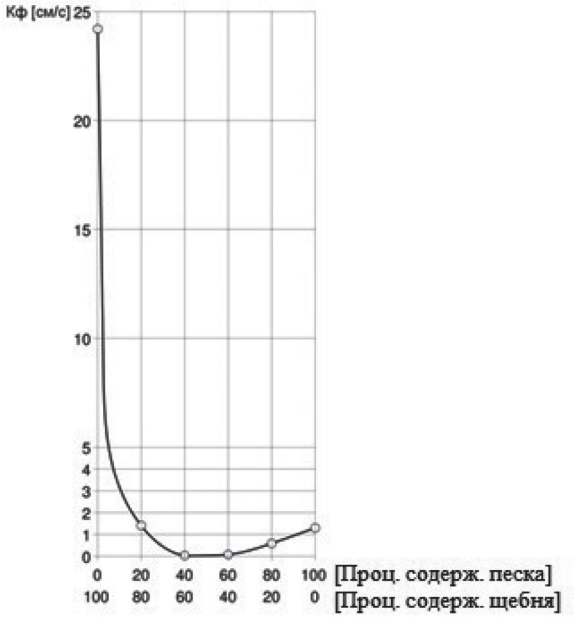


Рис. 1. Зависимость коэффициента фильтрации от процентного соотношение исследуемого образца

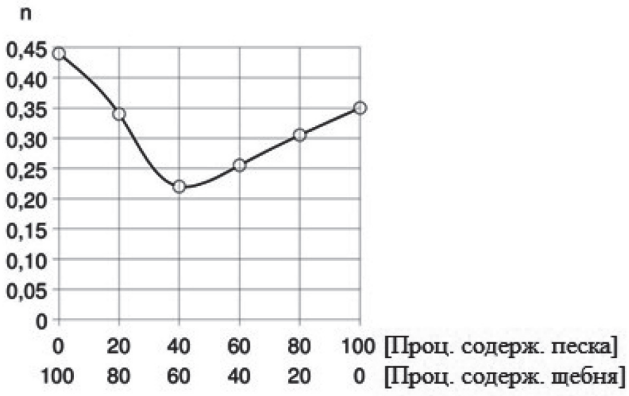


Рис. 2. Зависимость пористости от процентного соотношения исследуемого образца

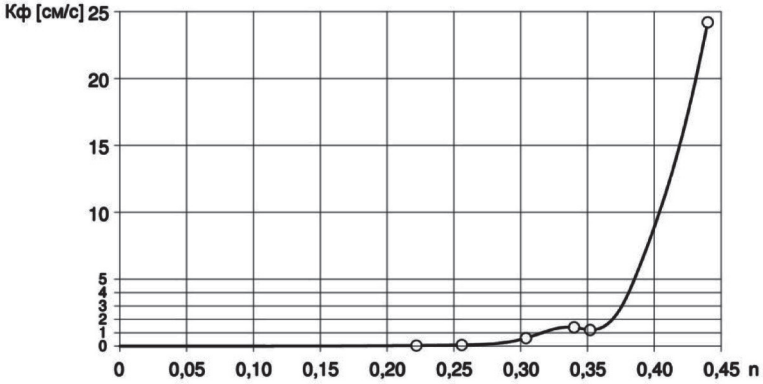


Рис. 3. Зависимость коэффициента фильтрации от пористости

Обсуждение (Discussion)

Вопросы, касающиеся свойств грунтов и их показателей, таких как плотность, прочность, пористость, влажность, коэффициент фильтрации и др., остаются неизменно важными для строительства и эксплуатации сооружений. Поэтому используя научную базу, созданную А. Дарси, Ю. Вейсбахом, Ж. Дюпюи, современные учёные продолжают свои исследования в данной области как в России [12], [13], так и за рубежом [14].

Проведя ранее описанный эксперимент и обработав его результаты, были построены графические зависимости и выявлено влияние процентного содержания щебёночно-песчаных смесей на коэффициент фильтрации (см. рис. 1) и пористость материала (см. рис. 2), а также коэффициента фильтрации от пористости (см. рис. 3). Исследования показали, что коэффициент фильтрации $k_ф$ в зависимости от процентного содержания образца изменяется нелинейно, у смесей № 2 и 6 он примерно одинаков, так же, как и у смесей № 3 и 4, но уже на порядок ниже. Самый низкий коэффициент фильтрации $k_ф$ обнаружен в смеси № 3 (см. рис. 1). Та же картина наблюдается и при изучении пористости материала (см. рис. 2). Этот эффект объясняется тем, что с увеличением процентного содержания песка в образце происходит удлинение пути просачивания жидкости за счёт сужения пор, что создает дополнительные сопротивления на пути фильтрационного потока. Зависимость коэффициента фильтрации от пористости (см. рис. 3) иллюстрирует малые значения коэффициента фильтрации $k_ф$ при пористости $n < 0{,}35$ и существенный рост этого коэффициента при достижении значения $n \leq 0{,}35$. Это объясняется достижением некоторой «свободы движения» фильтрационного потока при определённом показателе пористости и, как следствие, ощутимым снижением сопротивления.

Волнообразная форма графика до достижения значения пористости 0,35 обусловлена тем, что четыре точки, расположенные на гребне волны и слева о него, описывают фильтрационный процесс через комбинированную смесь «щебень – песок», а пятая точка графика, лежащая в «занижении», описывает фильтрационный процесс через чистый песок. Хорошо известно, что грунты разной природы имеют разные свойства (в том числе значения коэффициента фильтрации) при одинаковой пористости.

Выводы (Summary)

1. Результаты, полученные в ходе эксперимента, подтверждают существенное уменьшение значения коэффициента фильтрации $k_ф$ комбинированной смеси при добавлении песка в щебень в указанном процентном содержании и доказывают, что при наличии двух грунтов, имеющих разные значения $k_ф$, возможна их комбинация таким образом, что коэффициент фильтрации $k_ф$ новой получившейся смеси будет в несколько раз ниже, чем каждого исходного грунта в отдельности.

2. Построенные зависимости могут оказать помощь в выборе необходимого состава инертных материалов (песка и щебня) для обеспечения заданного коэффициента фильтрации $k_ф$, а также облегчить прогнозирование фильтрационных свойств комбинированных грунтов с известными пропорциями, поскольку позволяют комбинировать пропорции смесей таким образом, что коэффициент фильтрации созданного материала будет на много порядков ниже, чем у каждого из исходных ингредиентов в отдельности. Таким образом, полученные в ходе эксперимента результаты могут быть эффективны и с пользой применены на практике.

3. Знание описываемых эффектов может быть применено при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, в геотехнике, мелиорации и нефтегазовом деле (в том числе при кольматации скважин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольдберг В. М.* Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. — М.: Недра, 1986. — 160 с.

2. *Королев В. А.* Водопроницаемость грунтов / В. А. Королев // Российская геологическая энциклопедия. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. — С. 198–212.

3. *Высоцкий Л. И.* Рекомендации по использованию формул для коэффициента Дарси при расчете распределения осреднённых скоростей / Л. И. Высоцкий // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. — 2014. — № 4 (16). — С. 204–212.

4. *Гладков С. О.* О законе Дарси в условиях сохранения энтальпии / С. О. Гладков // Письма в журнал технической физики. — 2002. — Т. 28. — № 20. — С. 50–57.

5. *Шевченко О. Н.* Особенности процесса многофазной фильтрации в условиях нарушения линейного закона Дарси / О. Н. Шевченко // Успехи современной науки. — 2016. — Т. 3. — № 2. — С. 52–56.

6. *Синцов И. А.* Фильтрация жидкости к горизонтальным скважинам после гидроразрыва пласта / И. А. Синцов // Инновационные технологии для нефтегазового комплекса. Сб. науч. тр., посвященный 45-летию кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» / под ред. В. П. Овчинникова. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. — С. 298–303.

7. *Шевченко О. Н.* Определение критических значений скоростей фильтрации в условиях нарушения закона Дарси / О. Н. Шевченко // Успехи современной науки и образования. — 2016. — № 2. — С. 140–145.

8. *Смирнов-Туманов Я. С.* Разработка лабораторной установки для исследования фильтрационных свойств комбинированной щебеночно-песчаной смеси / Я. С. Смирнов-Туманов, Н. М. Панченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 128–133. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-128-133.

9. *Толпаев В. А.* Влияние проницаемости гравийного фильтра на дебит буровой скважины при линейном законе Дарси / В. А. Толпаев, Ю. В. Харченко, В. В. Захаров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. — 2003. — № 3. — С. 36–42.

10. *Токарева М. А.* Трехмерная задача фильтрации жидкости в вязкоупругой деформируемой среде / М. А. Токарева // Сб. науч. тр. международной молодежной школы-семинара «Ломоносовские чтения

на Алтае» / под ред. Е. Д. Родионова. — Барнаул: Алтайский государственный университет, 2012. — С. 219–221.

11. *Котовец А. А.* Исследование фильтрации в скальном трещиноватом основании плотины с противофильтрацинной завесой и дренажом / А. А. Котовец // Мелиорация антропогенных ландшафтов: Межвузовский сб. науч. ст. — Новочеркасск: Набла, 2005. — С. 133–135.

12. *Shtykov V. I.* The Performance of Geotextile Materials Used for Filtration and Separation in Different Structures as an Important Part of Geotextiles Requirements / V. I. Shtykov, L. S. Blazhko, A. B. Ponomarev // Procedia engineering. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 247–251. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.039.

13. *Blazhko L. S.* Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils / L. S. Blazhko, V. I. Shtykov, E. V. Chernyaev // Procedia engineering. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 710–715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.112.

14. *Kumor Ł. A.* Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment / Ł. A. Kumor, M. K. Kumor, M. Kopka // Procedia engineering. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 291–297. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.047.

REFERENCES

1. Gol'dberg, V.M., and N.P. Skvortsov. *Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh*. M.: Nedra, 1986.

2. Korolev, V.A. "Vodopronitsaemost' gruntov." *Rossiiskaya geologicheskaya entsiklopediya.* SPb.: Izdatel'stvo VSEGEI, 2010: 198–212.

3. Vysotskiy, Lev Ilich. "Guidance for the use of formulas for darcy coefficient calculating the distribution of averaged velocities." *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems* 4(16) (2014): 204–212.

4. Gladkov, S.O. "O zakone Darsi v usloviyakh sokhraneniya ental'pii." *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki* 28.20 (2002): 50–57.

5. Shevchenko, O.N. "The features of the multiphase flow process under the conditions of violation of the Darcy law." *Modern Science Success* 3.2 (2016): 52–56.

6. Sintsov, I.A. "Fil'tratsiya zhidkosti k gorizontal'nym skvazhinam posle gidrorazryva plasta." *Innovatsionnye tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchennyi 45-letiyu kafedry «Burenie neftyanykh i gazovykh skvazhin».* Tyumen': TyumGNGU, 2010: 298–303.

7. Shevchenko, O.N. "The determination of the values of filtration velocities in terms of violation of the Darcy law." *Modern Science Success* 2 (2016): 140–145.

8. Smirnov-Tumanov, Jaroslav Sergeevich, and Natalia Mikhailovna Panchenko. "The development of laboratory installation to study the filtration properties of the combined sand-gravel mixture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 128–133. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-128-133.

9. Tolpaev, V.A., Yu.V. Kharchenko, and V.V. Zakharov. "Vliyanie pronitsaemosti graviinogo fil'tra na debit burovoi skvazhiny pri lineinom zakone Darsi." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* 3 (2003): 36–42.

10. Tokareva, M.A. "Trekhmernaya zadacha fil'tratsii zhidkosti v vyazkouprugoi deformiruemoi srede." *Sbornik nauchnykh trudov statei mezhdunarodnoi molodezhnoi shkoly-seminara «Lomonosovskie chteniya na Altae».* Barnaul: Altaiskii gosudarstvennyi universitet, 2012: 219–221.

11. Kotovets, A.A. "Issledovanie fil'tratsii v skal'nom treshchinovatom osnovanii plotiny s protivofil'tratsinnoi zavesoi i drenazhom." *Melioratsiya antropogennykh landshaftov. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh statei.* Novocherkassk: Nabla, 2005: 133–135.

12. Shtykov, V.I., L.S. Blazhko, and A.B. Ponomarev. "The Performance of Geotextile Materials Used for Filtration and Separation in Different Structures as an Important Part of Geotextiles Requirements." *Procedia engineering* 189 (2017): 247–251. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.039.

13. Blazhko, Ludmila S., Valerii I. Shtykov, and Evgenii V. Chernyaev. "Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils." *Procedia engineering* 189 (2017): 710–715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.112.

14. Kumor, Łukasz Aleksander, Maciej Kordian Kumor, and Monika Kopka. "Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment." *Procedia engineering* 189 (2017): 291–297. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.047.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнов-Туманов Ярослав Сергеевич —
ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *smirnov-tumanov@gumrf.ru*

Панченко Наталия Михайловна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения императора
Александра I»
190031, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московский пр., 9
e-mail: *panchnat@rambler.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smirnov-Tumanov, Jaroslav S. —
assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *smirnov-tumanov@gumrf.ru*

Panchenko, Nataliy M. —
PhD, associate professor
Emperor Alexander I
Saint Petersburg
State Transport University
9 Moskovsky Av., St. Petersburg, 190031,
Russian Federation
e-mail: *panchnat@rambler.ru*

Статья поступила в редакцию 5 марта 2018 г.
Received: March 5, 2018.

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

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355

ADVANCEMENT OF LEAKAGES TESTING TECHNOLOGY FOR TESTING REACTOR CONTAINMENTS OF NEW ATOMIC VESSELS

V. V. Veselkov[1], V. P. Rydlovsky[2], V. V. Shtayts[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — JSC «Shipbuilding and Shiprepair Technology Center»,
St. Petersburg, Russian Federation

For safe operation of atomic icebreakers, one of the most important attributes is radiation and nuclear safety. In case of maximum design accident, radioactive emission in environment shall be limited to requirements, set in vessel design. Leakage degree of reactor containments of Russian and foreign atomic objects is specified by parameter called Permissible relative leak rate of test medium (air) at peak pressure of emergency medium. The achieved relative rate of leakage of protective shells of reactor compartments of icebreakers is 50 times worse than Russian nuclear power plants, and 100 times worse than the best foreign nuclear facilities. For the first time in the history of Russian shipbuilding reactor containments of new atomic icebreakers shall be tested with excessive pressure, that exceeds existing values (0.4 MPa instead of 0.1 MPa) in 4 times, and permissible relative leak rate shall be reduced in 25 times (in accordance with requirements of Russian Maritime Register of Shipping). Due to the above, increase of air relative leak rate detection threshold (i.e. increasing sensitivity of leakage monitoring) and automation of trials of reactor containments of new atomic icebreakers and other floating structures are now becoming an actual task. This article describes ways of increasing sensitivity of leakage monitoring of reactor containments of atomic vessels: application of monitoring procedures involving tared leakages and calibrated holes, analysis of mathematical models of traditional monitoring procedures, use of automated leakage monitoring system.

Keywords: atomic vessel, icebreaker, leak tightness, trials, reactor compartment, reactor containment.

For citation:
Veselkov, Vjacheslav V., Vladimir P. Rydlovsky, and Valentin V. Shtayts. “Advancement of leakages testing technology for testing reactor containments of new atomic vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 346–355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

УДК 620.165.29:629.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМНЫХ СУДОВ НОВЫХ ПРОЕКТОВ

В. В. Веселков[1], В. П. Рыдловский[2], В. В. Штайц[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

При эксплуатации атомных ледоколов одним из важнейших качеств является радиационная и ядерная безопасность. В случае максимальной проектной аварии выход радиационной среды во внешнюю среду должен быть ограничен требованиями, заданными в проекте судна. Степень герметичности защитных оболочек зарубежных и российских объектов характеризуют параметром «допустимая относительная скорость утечки массы испытательной среды (воздуха) при максимальной величине давления аварийной

среды». Достигнутая относительная скорость утечки защитных оболочек реакторных отсеков ледоколов в 50 раз хуже российских атомных электростанций и в 100 раз хуже лучших зарубежных атомных объектов. Впервые в российском судостроении защитные оболочки новых проектов атомных ледоколов должны испытываться при избыточном давлении в четыре раза выше существующих значений (0,4 МПа вместо 0,1 МПа), а допустимая относительная скорость утечки, согласно требованиям Правил Российского морского регистра судоходства, уменьшится в 25 раз. В связи с этим становится актуальной задача повышения порога чувствительности контроля относительной скорости утечки массы воздуха и автоматизации технологии испытаний защитных оболочек атомных паропроизводящих установок в процессе строительства ледоколов новых проектов и других атомных объектов морской техники. В статье описаны способы повышения чувствительности контроля герметичности защитных оболочек судов с атомными паропроизводящими установками: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий, анализ математических моделей традиционных способов контроля, применение автоматизированной системы контроля герметичности.

Ключевые слова: атомное судно, ледокол, герметичность, испытания, реакторный отсек, защитная оболочка.

Для цитирования:
Веселков В. В. Совершенствование технологии испытаний на герметичность защитных оболочек атомных судов новых проектов / В. В. Веселков, В. П. Рыдловский, В. В. Штайц // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 346–355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

Введение (Introduction)

Защитные оболочки (ЗО), ограждающие атомные паропроизводящие установки (АППУ) судов, являются одним из важнейших барьеров защиты окружающей среды от источников радиоактивных загрязнений, возникающих как при нормальной эксплуатации АППУ, так в случае возможных аварийных ситуациий. ЗО является локализующей системой для герметизированных помещений, в которых располагаются реактор и содержащие радиоактивные вещества системы и элементы АППУ. При этом ЗО включает реакторную выгородку (аппаратное помещение) прочноплотного исполнения и систему ее / его осушения, снижения в ней / нём давления, очистки воздуха, обеспечивающую предотвращение или ограничение выхода в реакторный отсек радиоактивных веществ и парогазовой смеси при разгерметизации первого контура реакторной установки и/или паропроводов. Поэтому высокая степень герметичности ЗО является одним из важнейших показателей экологической безопасности АППУ. Одной из задач совершенствования атомного ледокольного флота является обеспечение радиационной безопасности и достаточной степени герметичности ЗО АППУ судов, которая служит основным барьером локализации аварийной среды при максимальной проектной аварии (МПА).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В России судостроительным заводом, специализирующимся на постройке ледоколов и судов снабжения с атомными энергетическими установками, является АО «Балтийский завод». В настоящее время на АО «Балтийский завод» заканчивается строительство плавучей атомной теплоэлектростанции пр. 20870, идет строительство атомных ледоколов пр. 22220. Ведется проектирование сверхмощного атомного ледокола «Лидер».

Ледокол проекта № 22220 снабжен двумя реакторными установками, каждая из которых размещается в своей автономной ЗО. Внутренние размеры ЗО: длина 6,0 м, ширина — 6,0 м, высота — 15,5 м. Между двумя ЗО расположен коффердам шириной 1,12 м (в свету). Внутренний объем ЗО разделен на два помещения: аппаратное и реакторное. Основной объем внутри ЗО занимает аппаратное помещение, ниже которого находится реакторное (подблочное) помещение. Реакторное помещение отделено от аппаратного герметичным настилом блоков биологической защиты, расположенных ниже боковых выводов пара и питательной воды из парогенератора. Схема ЗО реакторной установки проектируемого атомного ледокола «Лидер» приведена на рис. 1 [1]. Указанная ЗО рассчитана на восприятие избыточного давления газа при 0,4 МПа.

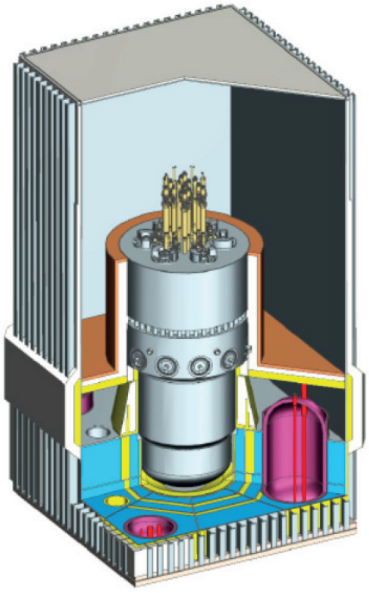


Рис. 1. Схема защитной оболочки реакторной установки

Требования к герметичности ЗО атомных судов изложены в Правилах Российского морского регистра судоходства (РС) [2], [3]. Для контроля герметичности ЗО традиционно используется манометрический способ и несколько вариантов его реализации: абсолютный способ, относительные способы, способ с термостатируемой емкостью.

Расчетные зависимости определения относительной скорости утечки L для традиционных способов контроля герметичности [4] имеют вид:

– абсолютный способ:

$$L_{\text{AC}} = \frac{2400}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}\right); \tag{1}$$

– относительный способ 1 (эталонная емкость внутри конструкции):

$$L_{\text{OC1}} = \frac{2400}{\tau} \cdot \frac{1}{P} \cdot \left(\Delta P_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} - \Delta P_0\right); \tag{2}$$

– относительный способ 2 (эталонная емкость вне конструкции):

$$L_{\text{OC2}} = \frac{2400}{\tau} \cdot \left[\frac{1}{P_0}\left(\Delta P_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} - \Delta P_0\right) + 1 - \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{T_1^{\text{Э}}}{T_0^{\text{Э}}}\right]; \tag{3}$$

– способ с термостатируемой емкостью:

$$L_{\text{TE}} = \frac{2400}{\tau \cdot P_0} \cdot \left[P_T \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \Delta P \cdot \frac{T_0}{T}\right], \tag{4}$$

где P_0, P_1 — абсолютное давление воздуха в испытываемой конструкции в начале и в конце контроля; T_0, T_1 — средняя температура воздуха в испытываемой конструкции в начале и в конце контроля; $T_0^{\text{Э}}$, $T_1^{\text{Э}}$ — температура воздуха в эталонном сосуде в начале и в конце контроля; ΔP_0, ΔP_1 — перепад давления между эталонной емкостью и испытываемой конструкцией в начале и конце контроля; $P_{\text{т}}$ — давление в термостатируемой запоминающей емкости; τ — продолжительность испытаний.

Для повышения радиационной безопасности в РС [2] было введено новое требование в п. 6.10 ч. IV «Корпус»: «*Допускаемая величина относительной скорости утечки при расчетном давлении испытаний должна быть обоснована проектантом из условий радиационной безопасности с учетом действующих норм радиационной безопасности для персонала и населения.*

При этом следует руководствоваться положением, что уменьшение допускаемой величины относительной скорости утечки до величины 1 % / сут и менее по сравнению с расчетной максимально допускаемой снижает потенциальную радиационную опасность персонала и населения при МПА и поэтому должна устанавливаться из возможности её достижения и измерения».

Впервые в российском судостроении ЗО новых проектов атомных ледоколов должны испытываться при избыточном давлении в четыре раза выше существующих значений (0,4 МПа вместо 0,1 МПа), а допустимая относительная скорость утечки, согласно требованиям последней редакции правил РС по атомным судам [2], уменьшится в 25 раз и составит 1,0 % в сут. До настоящего времени испытания защитных оболочек атомных судов с такими параметрами не проводились. Данное требование привело к необходимости изменения технологии испытаний на герметичность ЗО судовых АППУ новых проектов атомных судов [5] и [6] в части увеличения чувствительности приборов контроля падения испытательного давления, дополнительного измерения температуры и влажности внутри ЗО, алгоритма обработки результатов измерений. Таким образом, становится актуальной задача повышения порога чувствительности контроля относительной скорости утечки массы воздуха до 0,2 – 0,8 % в сут.

Авторы предлагают ряд способов повышения чувствительности контроля, а именно: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий [7], анализ математических моделей традиционных способов контроля [8], новый технологический процесс и автоматизированная система контроля герметичности защитных оболочек атомных судов, описанные в настоящей статье.

Результаты (Result)

Для повышения чувствительности испытаний к конструкции предлагается подключать по очереди две оттарированные течи с известными расходами во всем диапазоне испытательных давлений. Для каждой течи проводятся испытания до момента выполнения критериев достоверности. Расчетные формулы для натекания через дефект $q_д$ и относительной скорости утечки L имеют следующий вид:

$$q_д = \frac{q_{ТТ1} \cdot \tau_1 - q_{ТТ2} \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1}; \quad (5)$$

$$L = \frac{8{,}64 \cdot 10^6 \cdot q_д}{P_0 \cdot V}, \quad (6)$$

где q_1 — натекание через первую тарированную течь; q_2 — натекание через вторую тарированную течь; ΔP — падение давления; τ_1 — время падения давления ΔP через первую тарированную течь; τ_2 — время падения давления ΔP через вторую тарированную течь; P_0 — абсолютное давление воздуха в начале испытания; V — объем конструкции.

Для разработанного способа с двумя калиброванными отверстиями герметичность конструкций по критерию f/V определяется по формуле

$$\frac{f}{V} = \frac{c}{t} \cdot \left(\Delta P_{1и} - \left(\Delta P_{1и} - \Delta P_{2и} \right) \cdot \frac{f_{k1}}{f_{k1} - f_{k2}} \right), \quad (7)$$

где f — площадь всех микронеплотностей оболочки; f_{k1}, f_{k2} — площадь калиброванных отверстий; c — коэффициент, зависящий от параметров процесса и среды истечения.

Математическое моделирование традиционных способов контроля герметичности позволяет еще на этапе разработки технологии испытаний определять важные параметры контроля — продолжительность испытаний, а также вклад погрешностей применяемых приборов в общую погрешность. Анализ разработанных математических моделей показал, что наименьшая продолжительность испытаний у относительного способа 1, наибольшая — у относительного способа 2, способы абсолютный и с термостатируемой ёмкостью имеют примерно равную продолжительность. Для всех способов контроля наименьший вклад в формирование общей погрешности ξ_L

вносят члены, связанные со временем контроля. Для обоих относительных способов и способа с термостатируемой ёмкостью несущественное влияние на величину ξ_L также оказывает погрешность измерения абсолютного давления.

При разработке автоматизированной измерительной системы контроля герметичности ЗО (АИС «Оболочка») был проведен поиск научно-технической информации, которая показала, что для испытаний ЗО энергоблоков отечественных и зарубежных АЭС на герметичность созданы автоматизированные измерительные системы [9] – [12], позволяющие передавать результаты измерений на удаленное расстояние от ЗО и обрабатывать их на компьютере в непрерывном режиме испытаний.

В АО «ЦТСС» в 2016 – 2017 гг. разработаны новый технологический процесс испытаний на герметичность ЗО, а также автоматизированная измерительная система испытаний на герметичность (АИС «Оболочка»). По сравнению с существующими методиками в разработанный алгоритм введены новые положения:

– необходимость разделения по отдельным технологическим документам испытания ЗО на прочность и герметичность;

– обоснован диапазон измерения относительной скорости утечки при заданных предельном объеме ЗО и ступенях испытательного давления;

– минимальное испытательное давление для контрольных испытаний ЗО предложено повысить с 0,15 до 0,19 МПа;

– на основании анализа результатов испытаний ЗО левого и правого борта АППУ ПЭБ предложено проводить основные испытания ЗО на одной ступени испытательного давления 0,5 МПа вместо испытаний на трех ступенях испытательного давления;

– необходимо выполнять контроль влажности в ЗО и при необходимости продувать ЗО сухим воздухом перед подъемом в ней испытательного давления;

– дополнительно к систематической погрешности учтена случайная погрешность измерения относительной скорости утечки;

– уменьшена погрешность приборов для измерения давления при основных и контрольных испытаниях ЗО до 0,01 % ВПИ, что позволит уменьшить время испытаний;

– дополнительно к критерию достоверности введены дополнительно два критерия: критерий минимально допустимого падения испытательного давления и критерий постоянства во времени относительной скорости утечки и погрешности ее измерения;

– для определения относительной скорости утечки и погрешности её измерения применяется метод наименьших квадратов, позволяющий аппроксимировать изменение во времени относительной скорости утечки;

– разработан способ определения времени температурной стабилизации, необходимого для достоверного определения относительной скорости утечки.

АИС «Оболочка» предназначена для использования в технологии испытаний на локальную и интегральную герметичность ЗО и позволяет определять относительную скорость утечки массы воздуха из ЗО объемом до 1000 м^3 в диапазоне от 0,1 до 25 % / сут с погрешностью не более 30 % при испытательном давлении от P_{02} = 0,19 МПа до P_{01} = 0,5 МПа, действующем до 24 ч. Блок-схема АИС «Оболочка» приведена на рис. 2.

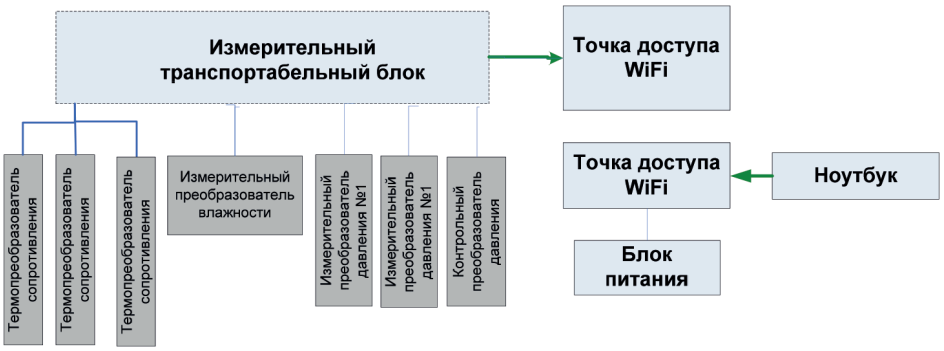


Рис. 2. Блок-схема АИС

Обсуждение (Discussion)

АИС «Оболочка» выполняет следующие основные функции:

– измеряет с помощью первичных преобразователей температуры, давления и влажности физические параметры воздуха;

– осуществляет беспроводную передачу результатов измерений на компьютер автоматизированного рабочего места (АРМ), установленного на расстоянии до 1 км от места измерений;

– представляет на мониторе компьютера текущие значения измеряемых параметров в цифровой или графической форме;

– обеспечивает регистрацию значений измеряемых параметров для формирования протоколов по ходу выполнения испытаний;

– производит расчет в реальном времени скорости относительной утечки массы воздуха по измеренным параметрам воздуха с учетом погрешности измерений;

– сохраняет результаты измерений на контроллере и компьютере АРМ;

– обеспечивает взаимодействие с архивом измерительных данных испытаний;

– документирует измеренные параметры в виде протоколов.

В АИС «Оболочка» входят следующие основные компоненты:

– первичные преобразователи (датчики);

– измерительный транспортабельный блок (рис. 3) с точкой доступа Wi-Fi;

– АРМ на базе ноутбука с точкой доступа Wi-Fi и блоком питания (рис. 4).

Вывод измерительной и иной информации производится на экраны монитора. Ввод информации от пользователя (оператора испытаний) осуществляется посредством пользовательского интерфейса специального программного обеспечения верхнего (операторского) уровня, клавиатуры, манипулятора типа «мышь». Связь измерительного блока с компьютером АРМ осуществляется через точки доступа Wi-Fi. Измерительный блок размещается в непосредственной близости от объекта испытания. ПО разделено на два уровня: нижнее и верхнее. ПО нижнего уровня устанавливается на контроллер измерительного блока и реализует получение и регистрацию данных измерений через цифровые интерфейсы от измерительных приборов и первичных преобразователей, снабженных собственными контроллерами, например, датчик давления. ПО верхнего уровня устанавливается на компьютер АРМ и реализует функции приема данных измерений, расчет параметров и регистрацию данных на жесткий диск. ПО нижнего уровня не является метрологически значимым, так как получает данные измерений по цифровым каналам и не вносит изменений в данные.



Рис. 3. Измерительный транспортабельный блок

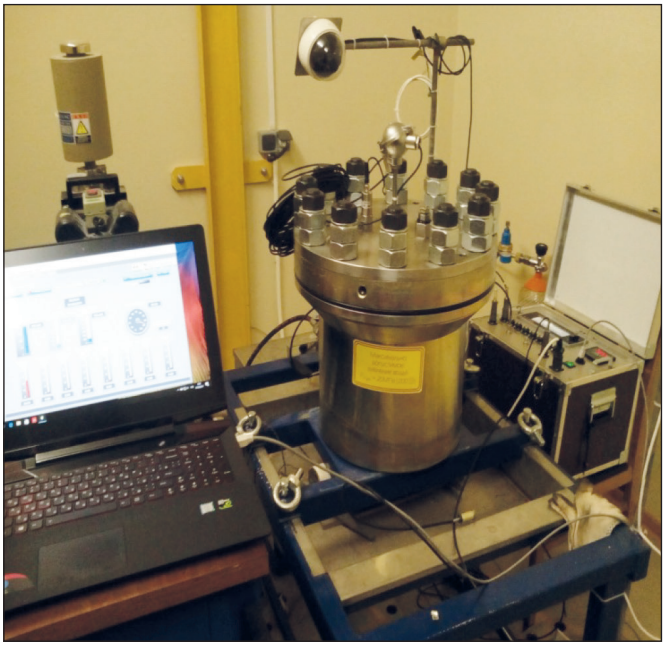


Рис. 4. АИС «Оболочка» и макет ЗО

ПО соответствует требованиям ГОСТ 19.101-77 «Единая система программной документации. Виды программ и программных продуктов». Измеренные в ходе проведения испытаний данные передаются по беспроводной или проводной сети на компьютер АРМ и хранятся на жестком диске компьютера. Контроллер измерительного блока делает резервную копию данных измерений на собственный диск. В случае сбоя связи данные измерений можно перенести на компьютер АРМ после восстановления связи.

Основные метрологические характеристики измерительных каналов АИС «Оболочка» даны в таблице.

Метрологические характеристики АИС «Оболочка»

Измеряемый параметр			Техническая характеристика	
Наименование	Номинальное значение с обозначением единиц измерения	Допуск с обозначением единиц измерения	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
Относительная скорость утечки воздуха из ЗО	от 0,1 до 10 % / сут	±35 %	±30 %	от 0,1 до 25 %/сут
Температура воздуха в ЗО (8 каналов)	от 5 °С до 40 °С	±0,2 °С	±0,15 °С	от 5 до 50 °С
Абсолютное давление воздуха в ЗО (измерение)	от 0,1 до 0,5 МПа от 0,1 до 0,19 МПа	±90 Па ±30 Па	0,01 % ВПИ	от 0 до 0,6 МПа от 0 до 0,2 МПа
Абсолютное давление воздуха в ЗО (контроль)	от 0,1 до 0,5 МПа	±1000 Па	кл.0,15	от 0 до 0,6 МПа
Относительная влажность воздуха в ЗО	от 5 до 95 %	±5 %	±3 %	от 0 до 98 %

Отработка методики проводилась на пневмогидравлическом стенде (рис. 5).

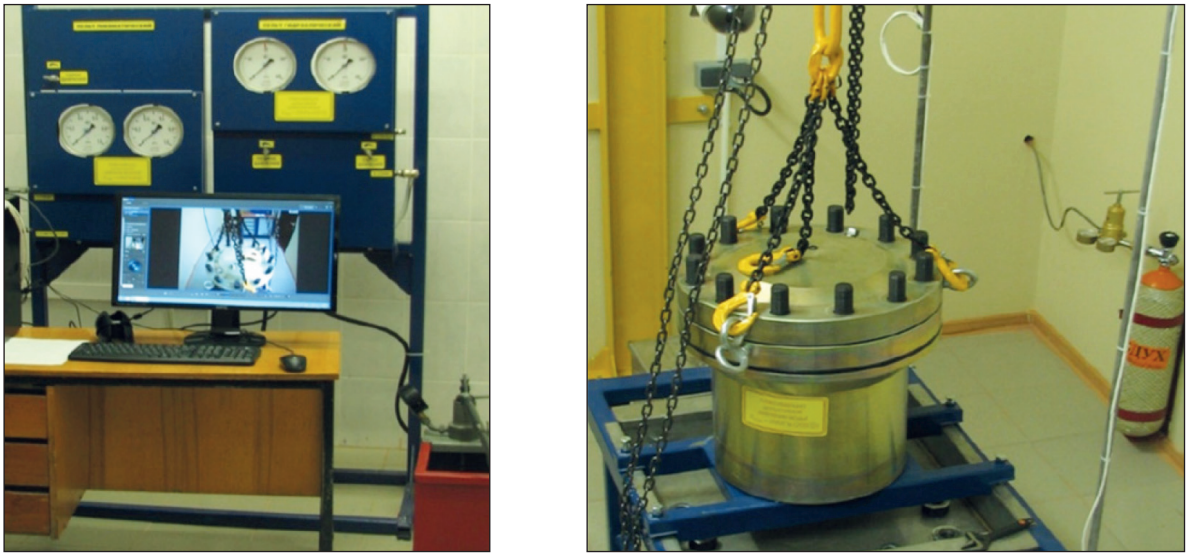


Рис. 5. Пневмогидравлический стенд МТ 448.0000.00

Пневмогидравлический стенд представляет собой цельно выполненную стальную емкость объемом 25 л с крышкой, которая крепится к емкости с помощью стальных шпилек и гаек. В смежной от емкости комнате находится пульт управления стендом. Стенд позволяет создавать гидравлическое давление в емкости до 20 МПа или пневматическое давление до 0,8 МПа.

Проверка достоверности вычислений АИС «Оболочка» проводилась путем сравнения результатов вычислений относительной скорости утечки и погрешности ее измерения в процессе испытания макета ЗО с результатами вычислений этих величин по ранее отработанной программе, созданной в Excel. Испытания проводились для трех калиброванных течей: 10^{-5}, 10^{-4} и 10^{-3} Вт. Для каждой калиброванной течи испытания выполнялись при двух начальных ступенях давления: максимальной — 0,5 МПа (основные испытания ЗО) и минимальной — 0,19 МПа (контрольные испытания ЗО). Перед началом испытаний каждая течь проходила дополнительную калибровку. Значения относительной скорости утечки и погрешности ее измерения, полученные с помощью АИС «Оболочка», сравнивались с аналогичными значениями, полученными расчетом в программе Excel, что показало практически полное их совпадение. Это говорит о том, что программное обеспечение АИС «Оболочка» позволяет достоверно вычислить значение относительной скорости утечки и соответствует заданному алгоритму расчета.

Заключение (Conclusion)

ЗО реакторных отсеков атомных судов являются одними из наиболее сложных судостроительных конструкций для испытаний на герметичность. Для повышения чувствительности контроля предложен ряд способов: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий, анализ математических моделей традиционных способов контроля, новый технологический процесс и автоматизированная система контроля герметичности защитных оболочек атомных судов. Новая технология позволяет обеспечить требуемые параметры испытаний, имеет согласование с РС, свидетельство о метрологической аттестации методики измерений. На алгоритм испытаний подана заявка на изобретение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фадеев Ю. П.* РУ повышенной мощности для атомного ледокола «Лидер» / Ю. П. Фадеев, [и др.] // Труды Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике (Санкт-Петербург, 6 – 8 июня 2016 г.). — СПб., 2016. — С. 170–173.

2. НД № 2-020101-112. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. — СПб.: РМРС, 2018. — 158 с.

3. НД № 2-030101-014. Руководство по техническому наблюдению за постройкой атомных судов и плавучих сооружений, судов атомно-технологического обслуживания, изготовлением материалов и изделий. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 60 с.

4. *Воронин А. И.* Сравнение точности традиционных способов контроля интегральной герметичности на основе метрологического анализа и математического моделирования / А. И. Воронин, В. М. Кузавков, В. В. Штайц // Сб. матер. 5-й Международной конф. по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-2003». — СПб., 2003. — С. 135–138.

5. *Fleckenstein T.* Nuclear Power Plant Olkiluoto 3–Containment Leakage Test Under Extreme Conditions / T. Fleckenstein // Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie. — 2015. — Vol. 60. — Is. 1. — Pp. 22–24.

6. *Аполлова А. В.* Расчет протечек воздуха через неплотности в контейнменте атомных судов / А. В. Аполлова // Тр. Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2017. — № 4. — С. 3–10.

7. Пат. 2217721 Российская Федерация, МПК G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Способ определения объема и/или степени герметичности оболочек большого объема / А. И. Воронин, В. Д. Горбач, В. М. Кузавков, В. В. Штайц; заяв. и патентообл.Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения. — № 2002127697/28; Заявлено 15.10.2002; Опубл. 27.11.2003. — Бюл. № 33.

8. Пат. 2292536 Российская Федерация, МПК G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Способ определения объёма и/или степени герметичности замкнутой оболочки / А. И. Воронин, В. Д. Горбач, В. М. Кузавков, В. В. Штайц; заяв. и патентообл. Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения. — № 2005123942/28; Заявлено 27.07.2005; Опубл. 27.01.2007. — Бюл. № 3.

9. *Cho C. S.* Dependability enhancement of reactor containment in safety critical nuclear power plants / C. S. Cho, W. H. Chung, D. Gao, H. Zhang, S. Y. Kuo // Dependable Computing (PRDC), 2011 IEEE 17th Pacific Rim International Symposium on. — IEEE, 2011. — С. 129–134. DOI: 10.1109/PRDC.2011.24.

10. *Cho C. S.* Measurement and analysis of the leak tightness of reactor containment vessels: experiences and results / C. S. Cho, W. H. Chung, S. Y. Kuo // Nuclear Engineering and Design. — 2015. — Vol. 292. — Pp. 112–122. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.003.

11. *Нефедьев Д. И.* Система мониторинга состояния защитной оболочки энергоблока АЭС / Д. И. Нефедьев, М. С. Зверев, Д. А. Голованов // Датчики и системы. — 2011. — № 4. — С. 10–13.

12. *Хлесткин Д. А.* Испытания системы герметичных ограждений атомных электростанций на плотность / Д. А. Хлесткин. — М.: ИИКЦ «Эльф-3», 2004. — 80 с.

REFERENCES

1. Fadeev, Yu.P., et al. “RU povyshennoi moshchnosti dlya atomnogo ledokola «Lider».” *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po sudostroeniyu i okeanotekhnike (Sankt-Peterburg, 6-8 iyunya 2016 g.).* SPb., 2016. 170–173.

2. Russian Federation. Normative document ND №2-020101-112. Pravila klassifikatsii i postroiki atomnykh sudov i plavuchikh sooruzhenii. SPb.: RMRS, 2018.

3. Russian Federation. Normative document ND №2-030101-014. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za postroikoi atomnykh sudov i plavuchikh sooruzhenii, sudov atomno-tekhnologicheskogo obsluzhivaniya, izgotovleniem materialov i izdelii. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.

4. Voronin, A.I., V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. “Sravnenie tochnosti traditsionnykh sposobov kontrolya integral’noi germetichnosti na osnove metrologicheskogo analiza i matematicheskogo modelirovaniya.” *Sbornik materialov 5-i mezhdunarodnoi konferentsii po morskim intellektual’nym tekhnologiyam Morintekh-2003.* SPb., 2003. 135–138.

5. Fleckenstein, Tobias. “Nuclear Power Plant Olkiluoto 3–Containment Leakage Test Under Extreme Conditions.” *Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie* 60.1 (2015): 22–24.

6. Apollova, A. V. “Raschet protechek vozdukha cherez neplotnosti v konteinmente atomnykh sudov.” *Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 4 (2017): 3–10.

7. Voronin, A.I., V.D. Gorbach, V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. RU 2 217 721 C1, IPC G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Sposob opredeleniya ob"ema i/ili stepeni germetichnosti obolochek bol'shogo ob"ema. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2003.

8. Voronin, A.I., V.D. Gorbach, V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. RU 2 292 536 C1, IPC G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Sposob opredeleniya ob"ema i/ili stepeni germetichnosti zamknutoi obolochki. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Jan. 2007.

9. Cho, Chi-Shiang, Wei-Ho Chung, Deyun Gao, Hongke Zhang, and Sy-Yen Kuo. "Dependability enhancement of reactor containment in safety critical nuclear power plants." *Dependable Computing (PRDC), 2011 IEEE 17th Pacific Rim International Symposium on*. IEEE, 2011. 129–134. DOI: 10.1109/PRDC.2011.24.

10. Cho, Chi-Shiang, Wei-Ho Chung, and Sy-Yen Kuo. "Measurement and analysis of the leak tightness of reactor containment vessels: experiences and results." *Nuclear Engineering and Design* 292 (2015): 112–122. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.003.

11. Nefed'ev, D.I., M.S. Zverev, and D.A. Golovanov. "Monitoring system of the condition of containment shell of power generating unit of nuclear power plant." *Sensors & Systems* 4 (2011): 10–13.

12. Khlestkin, D.A. *Ispytaniya sistemy germetichnykh ograzhdenii atomnykh elektrostantsii na plotnost'*. M.: IIKTs «El'f-3», 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселков Вячеслав Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *inbox@sstc.spb.ru*,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Рыдловский Владимир Петрович —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
АО «Центр судостроения и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: *rydlovskii@mail.ru*

Штайц Валентин Валерьевич —
ведущий инженер технолог
АО «Центр судостроения и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: *shtayts_vv@sstc.spb.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselkov, Vjacheslav V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *inbox@sstc.spb.ru*,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Rydlovsky, Vladimir P. —
PhD, Senior Researcher
JSC «Shipbuilding and Shiprepair
Technology Center»
7 Promyshlennaja Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: *rydlovskii@mail.ru*

Shtayts, Valentin V. —
Leading engineer-technologist
JSC «Shipbuilding and Shiprepair Technology Center»
7 Promyshlennaja Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: *shtayts_vv@sstc.spb.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-356-362

DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASE FOR RESEARCH INTO COMPENSATION OPPORTUNITIES OF DEVIATIONS IN THE SHIP PIPING SYSTEMS

T. M. Do[1], K. N. Sakhno[2]

[1] — Vietnam Maritime University, Hai Phong, Socialist Republic of Vietnam
[2] — Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

To improve the technology of ship piping systems at the design stage is an actual problem. The authors have analyzed technological features of manufacturing ship piping systems and have also considered the current state of design, manufacture and installation of ship pipeline issues. The review of research in the field of compensation of deviations of pipeline routes is presented. The problem of improving technology of ship piping systems at the design stage is considered providing the possibility of manufacturing pipes without removing dimensions in place. The authors have proposed the solution for the issue within studies of relationship of configuration and compensatory possibilities of pipeline routes. The authors are suggesting the idea of using straight pipes for moving the pipeline route to compensate for errors in the manufacture of pipes and the installation of tightly fixed connections of equipment, saturation products, etc., which ensures collecting the route without changing configuration of ready-made pipes. The proposed development allows to control and reduce at the design stage possible deviations that occur in the manufacture of pipes, to minimize the gaps assigned to the tracing of pipelines.

The authors have reached the following research outcomes: mathematical description of the compensation capabilities of pipeline routes by using straight pipes; 3D models of compensation area are constructed; the necessary condition for full compensation of deviations, without the use of measure pipes lies in the presence in the track of two pairs of straight pipes with non-planar directions. The theoretical basis for designing an automated program has been developed that will allow determining the areas of compensatory opportunities for pipeline routes. The authors proposed the idea of replacing bottom pipes for the pipes supplied, which helps to reduce the time for constructing ships.

Keywords: compensation area, manufacturing, design, installation, ship's piping system, route, measured pipe, adjustable pipe, deflection, spherical coordinate systems.

For citation:
Do, Tat Manh, and Konstantin N. Sakhno. "Development of theoretical base for research into compensation opportunities of deviations in the ship piping systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 356–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-356-362.

УДК 629.12

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТКЛОНЕНИЙ В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ ТРУБОПРОВОДОВ

Т. М. До[1], К. Н. Сахно[2]

[1] — Вьетнамский морской университет,
Хайфон, Социалистическая Республика Вьетнам
[2] — ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Повышение технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования является актуальной проблемой. Проведён анализ технологических особенностей изготовления судовых трубопроводов. Рассмотрено современное состояние вопроса проектирования, изготовления и монтажа судовых трубопроводов. Представлен обзор исследований в области компенсации отклонений трубопроводных трасс. В ходе исследований компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов установлено математическое описание компенсационных возможностей трасс трубопроводов путём использования прямых труб; построены трехмерные модели области компенсации; доказано необходимое

условие полной компенсации отклонений без применения забойных труб — наличие в трассе двух пар прямых труб некомпланарных направлений; разработана теоретическая основа для создания автоматизированной программы, которая позволит определить области компенсационных возможностей для трасс трубопроводов. Предлагаемая разработка позволяет на стадии проектирования управлением и снижением возможных отклонений, возникающих при изготовлении труб, минимизировать зазоры, устанавливаемые при трассировке трубопроводов. Предложена возможность замены забойных труб на поставляемые трубы, что способствует сокращению сроков постройки судов.

В работе рассматривается проблема повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования с обеспечением возможности изготовления труб без снятия размеров по месту и ее решение в рамках исследований взаимосвязи конфигурации и компенсационных возможностей трубопроводных трасс. Изложена идея об использовании прямых труб для перемещений трассы трубопровода с целью компенсации погрешностей изготовления труб и сборки жёстко фиксированных соединений оборудования, изделий насыщения и т. п., что обеспечивает собираемость трассы без изменения конфигурации готовых труб.

Ключевые слова: область компенсации, изготовление, проектирование, монтаж, трубопроводы, трассировка, забойная труба, пригоняемая труба, отклонение, сферические системы координат.

Для цитирования:

До Т. М. Разработка теоретической основы исследования компенсационных возможностей отклонений в судовых системах трубопроводов / Т. М. До, К. Н. Сахно // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 356–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-356-362.

Введение (Introduction)

Трудоемкость изготовления трубопроводов и сборки систем на судах составляет до 11 – 20 % от общей трудоемкости работы на верфи. Технология трубопроводов характеризуется разнообразием операций и низким уровнем механизации. Для этого производства требуется значительная и сложная подготовка [1] – [3] — рис. 1.

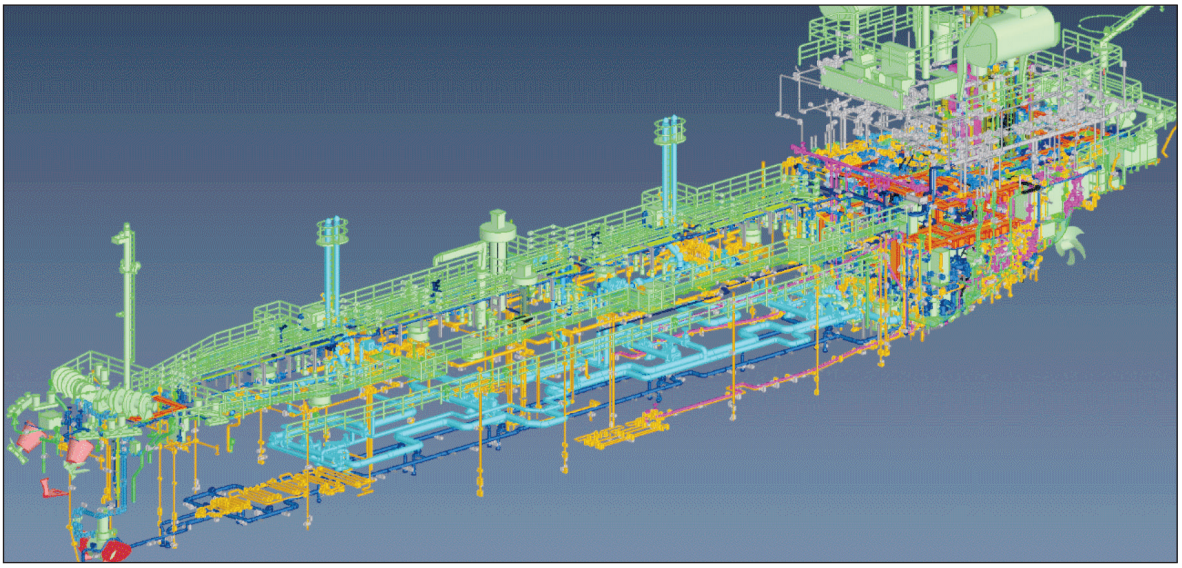


Рис. 1. Моделирование судовых систем трубопроводов при помощи ЭВМ

В связи с ранее изложенным, необходимо повышение эффективности производства за счет внедрения новых технологий для изготовления труб по проектной информации без уточнения по месту [1], [4], [5]. Наличие в проектной документации достаточной информации для производства и сборки труб позволяет комбинировать работы по строительству судна и сократить время завершения судостроительных заказов [3], [6], [7]. Кроме того, создаются предпосылки для создания автоматизированной программы, которая позволит оказать помощь в формировании региональных центров автоматизированного производства труб.

Для разработки альтернативных способов компенсации гипотеза о взаимосвязи между конфигурационными и компенсационными возможностями траектории проектирования трубопровода была выдвинута и обоснована в работе [1], фундаментальная идея которой заключается в использовании прямых и параллельных участков с соединениями труб для перемещения трассы трубопроводов. Это компенсирует общие отклонения жестко фиксированных соединений, которые ограничивают данную трассу, а также погрешности в изготовлении и монтаже труб, что обеспечит сбор трассы без изменения конфигурации готовых труб.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе [2] показано, что прямые трубы трасс или прямые участки трасс с погибами можно использовать для перемещения конечной точки трассы за счёт установки соединений с перекосом труб и поворота трассы в соединениях, находящихся на этих прямых трубах. При этом область, которую опишет конечная точка A, является областью компенсации возможных отклонений.

В данном исследовании применяем уравнения для определения области компенсации трасс в прямой задаче (при проектировании трубопровода). Другими словами, определяем возможность компенсации отклонений заданной трассы, уравнения для определения углов вращения прямых труб применяются в обратной задаче (при монтаже трубопровода), т. е. вначале определяем углы, на которые надо вращать прямые трубы для компенсации возникающих отклонений.

Рассмотрим трассу трубопроводов, которая состоит из последовательности точек C, C_1, F_1, ..., C_m, F_n, A (рис. 2). Каждая из них может быть либо точкой соединения двух труб, состоящих из последовательности точек $C(x_C, y_C, z_C)$, $C(x_{C1}, y_{C1}, z_{C1})$, …, $C(x_{Cm}, y_{Cm}, z_{Cm})$, без изменения направления трассы, либо точкой изгиба $F(x_{F1}, y_{F1}, z_{F1})$, $F(x_{F2}, y_{F2}, z_{F2})$, …, $F(x_{Fn}, y_{Fn}, z_{Fn})$ без изменения направления трассы. Последняя (конечная) точка $A(x_A, y_A, z_A)$. Трасса должна соединить начальную (C) и конечную точку (A), точное фактическое положение которых (относительно друг друга) в момент проектирования трассы неизвестно. Погрешность определяется областью возможных отклонений конечной точки трассы. Эта область задаётся в виде сферы или прямоугольного параллелепипеда в трехмерном пространстве (определяется предельными отклонениями от конечной точки трассы по каждой из координат).

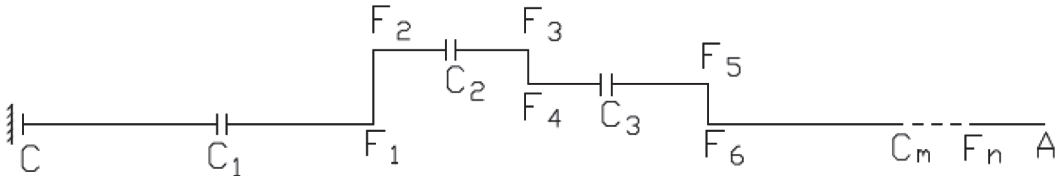


Рис. 2. Трасса труб

При установке первого соединения с перекосом труб, поворачивая трассу в соединении, находящаяся на этих прямых трубах конечная точка трассы описывает *вихор сферы* (рис. 3). Максимальная величина отклонения путём установки с перекосом зависит от длины прямых труб или расстояния между двумя соединениями.

Далее при установке второго соединения не перпендикулярно оси трубы, а взаимно параллельно, конечная точка трассы перемещается по некоторой траектории. Аналогично при смещении осей следующих соединений область компенсации представляет собой трёхмерное тело. Эта дуга, поверхность и трёхмерное тело и определяют область компенсации. В предлагаемом исследовании задачей является разработка математического описания определения области компенсации. Для решения задачи необходимо применить расчетный метод на основе разработки соответствующих теоретических положений и математических формул.

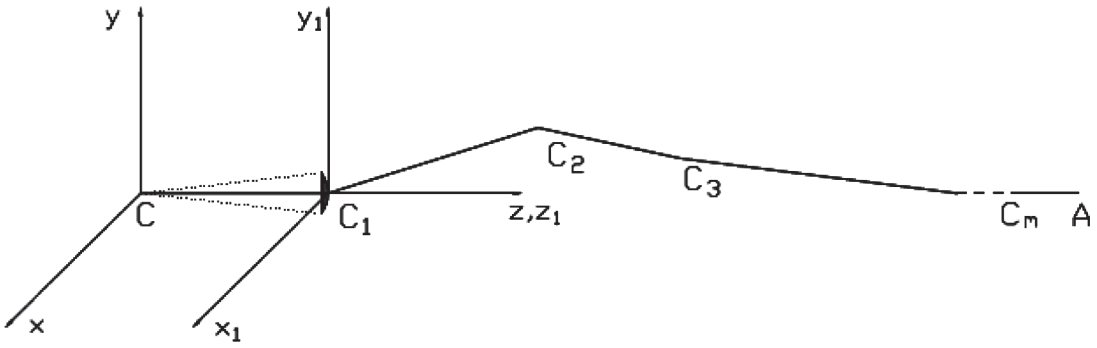


Рис. 3. Перенос оси систем координат

Воспользуемся декартовой системой координат *Cxyz*. При установке соединении в точке *C* с перекосом и поворотом трубы CC_1 получим три координаты (r, θ, φ), где r — кратчайшее расстояние до начала координат; θ, φ — зенитный и азимутальный углы соответственно. Для решения задачи оказывается удобным вместо декартовой системы использовать сферические системы координат.

Результаты (Results)

Три координаты (r, θ, φ) определены следующим образом:

– $r \geq 0$ — расстояние от начала координат *C* до заданной точки C_1;

– $0 \leq \theta \leq \alpha$ — угол между осью *Cz* и отрезком, соединяющим начало координат и последнюю точку трубы C_1 (таким образом, *Cz* — ось трубы), α определяется по ОСТу 5. 95057-90 [8].

– $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ — угол между осью *X* и проекцией отрезка, соединяющего начало координат с точкой C_1 на плоскости *Cxy* (таким образом, *Cxyz* — плоскость трубы).

Если заданы сферические координаты точки C_1, то переход к декартовым *Cxyz* осуществляется по формулам:

$$\begin{cases} x_{C1} = r_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\varphi_1; \\ y_{C1} = r_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\varphi_1; \\ z_{C1} = r_1 \cdot \cos\theta_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $r_1 = CC_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} = \sqrt{\left(x_{C1} - x_C\right)^2 + \left(y_{C1} - y_C\right)^2 + \left(z_{C1} - z_C\right)^2}$; θ_1 — угол перекоса [0, α]; φ_1 — угол поворота [0, 2π].

При параллельном переносе системы координат *Cxyz* в точку C_1 получим новую систему координат $C_1x_1y_1z_1$ (см. рис. 2). Формулы перехода от системы *Cxyz* к системе $C_1x_1y_1z_1$ принимают вид:

$$\begin{cases} x = x_1 + x_{C1}; \\ y = y_1 + y_{C1}; \\ z = z_1 + z_{C1}. \end{cases} \quad (2)$$

В новой системе координат $C_1x_1y_1z_1$ координаты точки соединения C_2 принимают вид:

$$\begin{cases} x_{C2} = r_2.\sin\theta_2.\cos\varphi_2; \\ y_{C2} = r_2.\sin\theta_2.\sin\varphi_2; \\ z_{C2} = r_2.\cos\theta_2, \end{cases} \quad (3)$$

где $r_2 = C_1C_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} = \sqrt{\left(x_{C2} - x_{C1}\right)^2 + \left(y_{C2} - y_{C1}\right)^2 + \left(z_{C2} - z_{C1}\right)^2}$; θ_2 — угол перекоса [0, α]; φ_2 — угол поворота [0, 2π].

В отличие от систем уравнений (1), (3), в системе уравнений (2) координаты точки соединения C_2 принимают вид:

$$\begin{cases} x = x_{C2} + x_{C1}; \\ y = y_{C2} + y_{C1}; \\ z = z_{C2} + z_{C1}. \end{cases}$$

Получим

$$\begin{cases} x = r_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\varphi_1 + r_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\varphi_2; \\ y = r_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\varphi_1 + r_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \sin\varphi_2; \\ z = r_1 \cdot \cos\theta_1 + r_2 \cdot \cos\theta_2. \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично при параллельном переносе системы координат следующих точек соединений до последней точки A координаты точки соединения A в первоначальной системе координат $Cxyz$ принимают следующий вид:

$$\begin{cases} x_A = \sum_{i=1}^{m} r_i \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_i; \\ y_A = \sum_{i=1}^{m} r_i \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_i; \\ z_A = \sum_{i=1}^{m} r_i \cdot \cos\theta_i, \end{cases} \quad (5)$$

где $r_i = C_{i-1}C_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = \sqrt{\left(x_{Ci-1} - x_{Ci}\right)^2 + \left(y_{Ci-1} - y_{Ci}\right)^2 + \left(z_{Ci-1} - z_{Ci}\right)^2}$; m — количество свободного соединения в трассе труб (C, C_1, C_2, …, C_m); θ_i — угол перекоса [0, α]; φ_i — угол поворота [0, 2π].

Уравнение (5) определяет траекторию перемещения последней точки трассы A. Эта траектория представлена на рис. 4.

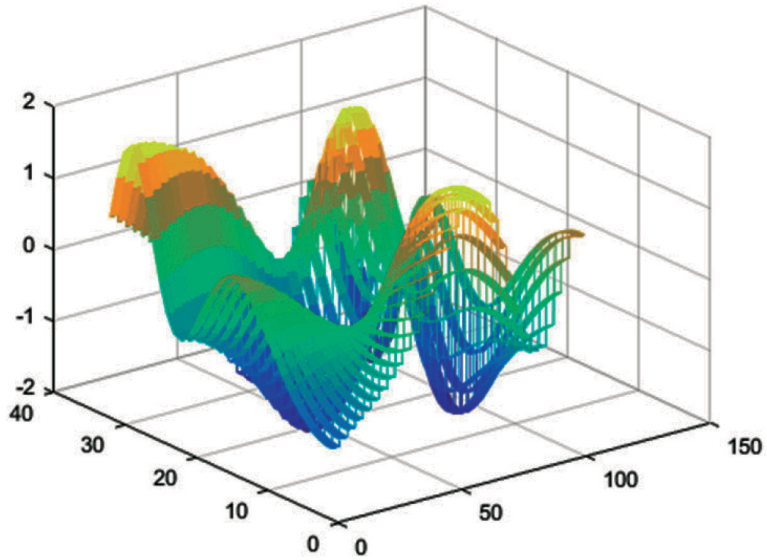


Рис. 4. Траектория смещения точки A при повороте i труб

Таким образом, x_A, y_A, z_A являются координатами вектора $\overrightarrow{CA}$. Для определения координат A после перемещения трассы по соединению в первоначальной системе координат $Oxyz$ используем следующую формулу:

$$\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CA}.$$

Обсуждение (Discussion)

В соответствии с предлагаемым подходом к компенсации отклонений трасс трубопроводов с использованием поворотов прямых труб соединения не устанавливаются перпендикулярно оси трубы, они взаимно параллельны, что позволяет перемещать трассы, состоящие из прямых труб, только для компенсации возможных отклонений жестко фиксированных соединений на фактически требуемое значение. При этом обнаруживается, что только с двумя прямыми трубами достаточно компенсировать отклонение по всем направлениям *Ox*, *Oy*, *Oz*. Однако в этом случае диапазон компенсации обычно маленький (в зависимости от длин прямых труб). Для того, чтобы увеличить область компенсации, необходимо увеличить количество прямых труб в трассе. Чем больше количество прямых труб, тем больше смещение конечной точки трассы.

Проблема совершенствования технологий судостроения в процессе изготовления и монтажа трубопроводов остается актуальной. Предыдущие исследования также были направлены на решение этой проблемы. В общем, предлагаемые подходы обычно оптимизируются при проектировании трубопровода [9] – [11], а также улучшается точность изготовления и сборки труб. В сочетании с предложенным в данной работе исследовательским направлением в будущем можно будет достигнуть важного этапа в процессе проектирования, изготовления и монтажа системы трубопроводов.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

– выполнено математическое описание компенсационных возможностей трасс трубопроводов путём использования прямых труб;

– построены трехмерные модели области компенсации;

– разработана теоретическая основа для создания автоматизированной программы, которая позволит определить области компенсационных возможностей для трасс трубопроводов;

– открывается возможность замены забойных труб на поставляемые трубы, что способствует сокращению сроков постройки судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сахно К. Н.* Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.04 / К. Н. Сахно. — Астрахань: АГТУ, 2012. — 353 с.

2. *Сахно К. Н.* Исследование возможностей создания обобщенного метода использования параллельных участков и прямых труб для компенсации отклонений судовых трубопроводных трасс / К. Н. Сахно, Т. М. До, Ч. К. Во // Молодой ученый. — 2016. — № 6 (110). — С. 181–184.

3. *Дженкова Р. В.* Анализ экономической эффективности новых технологий при изготовлении труб судовых систем / Р. В. Дженкова, Т. М. До, К. Н. Сахно // Инженерный вестник Дона. — 2016. — Т. 40. — № 1 (40). — С. 26.

4. *Safa M.* Automating measurement process to improve quality management for piping fabrication/ M. Safa, A. Shahi, M. Nahangi, C. Haas, H. Noori // Structures. — 2015. — Vol. 3. — Pp. 71–80. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.03.003.

5. *Haiteng S.* Pipe-assembly approach for ships using modified NSGA-II algorithm / S. Haiteng, N. Wentie, N. Yaxiao, Z. Chongkai, G. Weigao // Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing. — 2016. — Vol. 26 (2). — Pp. 34–42.

6. *Dang V. T.* Giao trinh tho ong tau thuy / V. T. Dang. — Hai Phong: Dai Hoc Hang Hai Viet Nam, 2005. — 45 p.

7. *Cao N. V.* Nghien cuu ung dụng phan mem ship constructor vao thiet ke cong nghe he thong đuong ong tau thuy bang mo hinh 3D tren may vi tinh / N. V. Cao // Tap chi: Khoa hoc cong nghe hang hai. — 2007. — № 10. — С. 84–86.

8. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — РТП НПО «Ритм». — 207 с.

9. *Park J. H.* Pipe-routing algorithm development: case study of a ship engine room design / J. H. Park, R. L. Storch // Expert Systems with Application. — 2002. — Vol. 23. — Is. 3. — Pp. 299–309. DOI: 10.1016/S0957-4174(02)00049-0.

10. *Jiang W. Y.* A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design / W. Y. Jiang, Y. Lin, M. Chen, Y. Y. Yu // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 63–70. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.028.

11. *Lee D. M.* Layout design optimization of pipe system in ship engine room for space efficiency / D. M. Lee, S. Y. Kim, B. Y. Moon, G. J. Kang // Journal of the Korean Society of Marine Engineering. — 2013. — Vol. 37. — Is. 7. — Pp. 784–791. DOI: 10.5916/jkosme.2013.37.7.784.

REFERENCES

1. Sakhno, K.N. Nauchnye osnovy povysheniya tekhnologichnosti truboprovodov sudovykh sistem na stadii proektirovaniya: Dr. diss. Astrakhan': AGTU, 2012.

2. Sakhno, K.N., T.M. Do, and Ch.K. Vo. "Issledovanie vozmozhnostei sozdaniya obobshchennogo metoda ispol'zovaniya parallel'nykh uchastkov i pryamykh trub dlya kompensatsii otklonenii sudovykh truboprovodnykh trass." *Molodoi uchenyi* 6(110) (2016): 181–184.

3. Dzhenkova, R.V., T.M. Do, and K.N. Sakhno. "Cost-effectiveness analysis of new technologies in the production of ship piping systems." *Engineering journal of Don* 40.1(40) (2016): 26.

4. Safa, Mahdi, Arash Shahi, Mohammad Nahangi, Carl Haas, and Hamid Noori. "Automating measurement process to improve quality management for piping fabrication." *Structures* 3 (2015): 71–80. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.03.003.

5. Haiteng, S., N. Wentie, N. Yaxiao, Z. Chongkai, and G. Weigao. "Pipe-assembly approach for ships using modified NSGA-II algorithm." *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing* 26(2) (2016): 34–42.

6. Dang, V.T. *Giao trinh tho ong tau thuy.* Hai Phong: Dai Hoc Hang Hai Viet Nam, 2005.

7. Cao, N.V. "Nghien cuu ung dụng phan mem ship constructor vao thiet ke cong nghe he thong đuong ong tau thuy bang mo hinh 3D tren may vi tinh." *Tap chi: Khoa hoc cong nghe hang hai. - Hai Phong* 10 (2007): 84–86.

8. Russian Federation. OST 5.95057-90. Sistemy sudovyye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Tipovoy tekhnologicheskiy protsess izgotovleniya i montazha truboprovodov. RTP NPO «Ritm».

9. Park, Jin-Hyung, and Richard L. Storch. "Pipe-routing algorithm development: case study of a ship engine room design." *Expert Systems with Applications* 23.3 (2002): 299–309. DOI: 10.1016/S0957-4174(02)00049-0.

10. Jiang, Wen-Ying, Yan Lin, Ming Chen, and Yan-Yun Yu. "A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design." *Ocean Engineering* 102 (2015): 63–70. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.028.

11. Lee, Dong-Myung, Soo-Young Kim, Byung-Young Moon, Gyung-Ju Kang. "Layout design optimization of pipe system in ship engine room for space efficiency." *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 37.7 (2013): 784–791. DOI: 10.5916/jkosme.2013.37.7.784.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

До Тат Мань — преподаватель
Вьетнамский морской университет
Социалистическая Республика Вьетнам, Хайфон, Ле Чан, 484 Лач Чаи
e-mail: *dotatmanh@gmail.com*

Сахно Константин Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: *k.sakhno@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Do, Tat Manh — Lecturer
Vietnam Maritime University
484 Lach Tray, Le Chan, Hai Phong,
Socialist Republic of Vietnam
e-mail: *dotatmanh@gmail.com*

Sakhno, Konstantin N. —
Doctor of Technical Sciences,
professor
Astrakhan State Technical University
414056, 16 Tatisheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: *k.sakhno@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2018 г.
Received: February 21, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378

PROSPECTS OF USING GAS OXYCARBONITRIDING AT RESTORATION OF COMPONENTS OF SHIP TECHNICAL MEANS

N. V. Bogdanova[1], A. A. Kuz'min[1], A. A. Shnurenko[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Joint Stock Company Kanonersky Shiprepairing Yard,
St. Petersburg, Russian Federation

Studies aimed at developing alternative solid chrome recovery methods and surface hardening of ship technical means. The use of traditional methods of galvanic coatings requires scarce metals and high energy costs. All technological processes of galvanic accompanied by formation of highly toxic waste. Therefore, relevant is the search for alternative, environmentally sound, cost-effective methods of restoration and protection details. As the research object were selected samples of the cylindrical form, steel 10 GOST 1050-89 imitating parts of marine engineering (diesel fuel pump plunger, piston pins, valves) and automotive parts (brake cylinder piston). In the work conducted comparative research of metrological and metallographic characteristics, corrosion resistance and durability of prototypes (after gas karbonitriding and oxidation) and control after chromium. Determine the effect of temperature and duration of oxidation to the corrosion test specimens. Found that the samples after the gas karbonitriding and oxidation in the air atmosphere with 350 ° C for 6:00 have maximum corrosion resistance in 6 – 10 times faster than resistance monitoring (chrome) samples. As a result, bench tests found that the samples after gas nitriding and oxidizing complies with the established requirements for durability and are not inferior to the control-chrome. Developed alternative solid chrome surface hardening technology details — oksikarbonitriding technology, including mechanical processing, preheating the air atmosphere and exposure for 60 min at temperature of 350 °C to 400 °C; short-term gas karbonitriding in an atmosphere of ammonia and ekzogaz when their ratio of 1:1 to 1:4 at 600 – 630 °C with cooling in oil or ekzogaz; polishing to a specified size; oxidation in air atmosphere at a temperature in the range from 300 °C to 400 °C for a period of up to 6:00. Oksikarbonitriding technology developed after proper adaptation can be used in the manufacture of parts of marine engineering instead of traditional hard chromium plating.

Keywords: electroplating, parts of marine engineering, gas karbonitridin, oxidation, corrosion resistance, durability, technology.

For citation:
Bogdanova, Natal'ya V., Aleksandr A.Kuz'min, and Anatolii A. Shnurenko. "Prospects of using gas oxycarbonitriding at restoration of components of ship technical means." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378.

УДК: 669-63

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ОКСИКАРБОНИТРИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Н. В. Богданова[1], А. А. Кузьмин[1], А. А. Шнуренко[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены исследования, направленные на разработку альтернативного твердому хромированию способа поверхностного восстановления и упрочнения деталей судовых технических средств. Использование традиционных методов гальванических покрытий требует применения дефицитных металлов и больших энергетических затрат. Все технологические гальванические процессы сопровождаются образованием высокотоксичных отходов. Поэтому актуальными являются поиски альтернативных, эколо-

гически чистых, экономически эффективных методов восстановления и защиты деталей судостроения. В качестве объекта исследований были выбраны образцы цилиндрической формы из Стали 10 ГОСТ 1050-89, имитирующие детали судового машиностроения (плунжер топливного насоса СДВС, поршневые пальцы, клапаны) и детали автопрома (поршень тормозного цилиндра). В работе проведены сравнительные исследования метрологических и металлографических характеристик коррозионной стойкости и долговечности опытных образцов (после газового карбонитрирования и оксидирования) и контрольных (после хромирования). Определено влияние температуры и длительности оксидирования на коррозионную стойкость образцов. Установлено, что опытные образцы после газового карбонитрирования и оксидирования в воздушной среде при 350 °С обладают максимальной коррозионной стойкостью, в 6 – 10 раз превосходящей стойкость контрольных (хромированных) образцов. В результате стендовых испытаний установлено, что опытные образцы после газового азотирования и оксидирования соответствуют установленным требованиям по долговечности и не уступают контрольным — хромированным. Разработана альтернативная твердому хромированию технология поверхностного упрочнения деталей — технология оксикарбонитрирования, включающая механическую обработку, предварительный нагрев в воздушной атмосфере и выдержку в течение 60 мин при температуре от 350 до 400 °С, кратковременное газовое карбонитрирование в атмосфере аммиака и экзогаза в соотношении 1:1 … 1:4 при 600 – 630 °С с охлаждением в масле или экзогазе, полирование в заданный размер, оксидирование в воздушной среде при температуре в диапазоне от 300 °С до 400 °С продолжительностью до 6 ч. Разработанная технология оксикарбонитрирования после соответствующей адаптации может быть использована при изготовлении деталей судового машиностроения вместо традиционного твердого хромирования.

Ключевые слова: гальванические покрытия, детали судового машиностроения, газовое карбонитрирование, оксидирование, коррозионная стойкость, долговечность, технология.

Для цитирования:
Богданова Н. В. Перспективы использования газового оксикарбонитрирования при восстановлении деталей судовых технических средств / Н. В. Богданова, А. А. Кузьмин, А. А. Шнуренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 10.21821/2309-5180-2018-10-2-363-378.

Введение (Introduction)

В судовом машиностроении многих стран для восстановления и упрочнения деталей судовых технических средств (СТС) находит применение большое количество методов сварки и наплавки, напыления, нанесения гальванических покрытий и т. д. Судоремонтные фирмы и предприятия для восстановления одних и тех же деталей нередко применяют различные технологии. Выбор метода и технологии восстановления часто обусловлен степенью освоенности метода, опытом, накопленным предприятием, а также наличием необходимого оборудования. Восстановление изношенных деталей для их повторного использования является одним из основных путей совершенствования технической эксплуатации флота на базе общегосударственной стратегии ускоренного внедрения малоотходных и ресурсосберегающих технологий.

Наряду с быстрыми темпами развития новых направлений восстановления деталей и нанесения покрытий продолжают совершенствоваться и известные технологии, в том числе гальванических покрытий. Для повышения коррозионной и износостойкости металлических деталей применяются различные гальванические процессы: никелирование, хромирование, кадмирование, цинкование и др. Гальванические покрытия используются при восстановлении таких ответственных деталей СДВС, как стальные и чугунные коленчатые валы, фундаментные блоки и рамы, втулки и поршни рабочих цилиндров, поршневые пальцы, клапаны, шатуны, плунжерные пары и т. д. [1] – [3]. Так, например, приобретать новые коленчатые валы взамен изношенных экономически нецелесообразно из-за их высокой стоимости.

Восстановление и упрочнение изношенных поверхностей коленчатых валов возможно нанесением гальванических покрытий — при износе до 0,5 мм хромированием, при износе свыше 0,5 мм никелированием с последующим хромированием толщиной 0,2 – 0,3 мм. Коленчатые валы судовых дизелей всех марок восстанавливаются фирмами LTC, Van der Horst Holland, DMA по одобренной Ллойдом технологии, включающей хромирование шеек коленчатых валов длиной до 8 м. В большинстве случаев чугуны и стали, применяемые для изготовления втулок цилиндров,

не обеспечивают их требуемой надежности, поэтому для уменьшения изнашивания рабочей поверхности ее иногда покрывают пористым хромом толщиной до 0,4 мм или подвергают лазерной закалке. Наружные поверхности втулок, омываемые водой, для повышения их коррозионной и кавитационной стойкости можно также хромировать или покрывать полимерными материалами.

Однако использование традиционных методов гальванических покрытий, таких как хромирование, цинкование, химическое никелирование и т. д. требует применения дефицитных металлов и высоких энергетических затрат. Все технологические процессы сопровождаются образованием высокотоксичных отходов. Это существенно ухудшает экологию производства и требует значительных затрат для повышения безопасности работы персонала и утилизации отходов. Так, например, отходы при использовании технологии твердого хромирования содержат особо вредные вещества для окружающей среды. Поэтому актуальным является поиск альтернативных, экологически чистых, экономически эффективных методов восстановления и защиты деталей СТС.

Газовое азотирование является экономичной и безопасной для окружающей среды технологией по сравнению с технологией твердого хромирования, так как позволяет сократить время процесса и затраты на него. Возможна обработка деталей практически любого размера и формы. Газовое азотирование является альтернативным вариантом имеющейся технологии твердого хромирования. Причиной для применения химико-термической обработки (ХТО) в аммиачных средах как метода защиты от коррозии служит появление низкотемпературного карбонитрирования и оксикарбонитрирования. Приведенные в ряде работ [4] – [6] результаты исследований подтверждают такую возможность. Известен разработанный фирмой «Айхелин» процесс кратковременного газового азотирования под названием «Нитрок», при котором азотирование осуществляют при 570 – 575 °С в смеси аммиака и неочищенного экзогаза при их соотношении 1 : 1 или 1 : 2 [7]. Недостатком этой технологии является тот факт, что полученные слои непригодны для эксплуатации в коррозионной среде.

В последние годы XX в. исследователями различных стран было установлено положительное влияние поверхностных оксидных слоев на износостойкость и коррозионную стойкость азотированных (карбонитрированных) деталей [8] – [10]. Сложные упрочненные слои, состоящие из зоны внутреннего азотирования, нитридного (карбонитридного) слоя и поверхностного оксидного слоя, получают обычно диффузионным насыщением в нитрирующей (карбонитрирующей) среде с последующей выдержкой изделий в окислительной среде [11] – [13]. Недостатком таких технологий является длительность процесса (до 70 ч) и необходимость использования сложного дорогостоящего оборудования для ионных процессов нитрирования и оксидирования. Сложность представляет также и сам процесс насыщения, требующий периодического изменения давления насыщающей среды. Присутствует возможность быстрого выхода из строя внутренних элементов ионного оборудования при подаче в камеру насыщения (для последующего оксидирования) водяного пара и т. д.

Известна технология ХТО стальных деталей [14] – [16], в соответствии с которой производят нагрев и выдержку деталей при 350 – 400 °С в течение 10 – 30 мин в воздушной атмосфере, далее азотирование в атмосфере аммиака и экзогаза при их соотношении 1 : 4 при 570 – 590 °С, оксидирование в экзогазе в этом же рабочем пространстве и при той же температуре без подачи аммиака в течение 1 – 2 ч и охлаждение в масле. Способ позволяет увеличить износостойкость и коррозионную стойкость деталей, а также использовать для его реализации стандартное оборудование для химико-термической обработки в условиях индивидуального и мелкосерийного производства.

Недостатками способа являются невысокая коррозионная стойкость полученных изделий, возможность возникновения деформаций деталей при охлаждении в масле, ограничение использования технологии в крупносерийном производстве на проходном оборудовании без изменения его конструкции (строительства дополнительной камеры охлаждения в экзогазе).

Настоящее исследование проведено с целью разработки альтернативного твердому хромированию технологического процесса поверхностного упрочнения деталей СТС. В качестве объекта исследований были выбраны образцы цилиндрической формы, имитирующие детали судо-

вого машиностроения (плунжер топливного насоса СДВС, поршневые пальцы, клапаны) и автопрома (поршень тормозного цилиндра). Учитывая особенности эксплуатации деталей, связанные с трением и коррозионным воздействием, необходимо найти способ поверхностной обработки, повышающий коррозионную стойкость и износостойкость одновременно. В аналитических источниках не найдены конкретные данные об оптимальном методе поверхностной обработки деталей, отвечающем заданным требованиям, а также о влиянии различных видов поверхностной обработки на их геометрические размеры, влиянии температуры и длительности оксидирования на коррозионную стойкость поверхностных слоев и др.

Поэтому в работе была выполнена проверка возможности использования процесса оксикарбонитрирования, состоящего из газового карбонитрирования и оксидирования, для поверхностного упрочнения деталей. В процессе исследования определяли влияние параметров процесса на геометрические характеристики образцов, влияние среды охлаждения после азотирования (масло, экзогаз), температуры и времени оксидирования на металлографические характеристики, фазовый состав, коррозионную стойкость и долговечность.

Задачами исследования являлись повышение коррозионной стойкости изделий, снижение деформации деталей, повышение размерной точности, возможность использования предлагаемой технологии вместо твердого хромирования, снижение трудоемкости и улучшение условия труда.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве материала образцов использовалась Сталь 10 ГОСТ 1050-89. Маркировку в виде цифр наносили на донную часть поверхности образца. Исследование проводили в следующих направлениях:

– изготовление опытных партий образцов по технологии: газовое карбонитрирование и оксидирование при различных значениях температуры (350 °С, 550 °С и 580 °С) и времени выдержки (от 1 до 6 ч);

– исследование влияния температуры и времени оксидирования азотированных образцов на их геометрические характеристики и коррозионную стойкость;

– проведение сравнительных стендовых испытаний на долговечность;

– исследование влияния операции предварительного (перед оксидированием) полирования азотированных образцов на их геометрические характеристики;

– разработка технологии оксикарбонитрирования для поверхностного упрочнения деталей.

Исследование геометрических параметров, коррозионной стойкости и долговечности образцов проводили в сравнении с деталями, обработанными по базовому режиму (хромирование) на современном отечественном и зарубежном оборудовании. Кратковременное газовое карбонитрирование[1] образцов всех вариантов обработки проводили в проходных печах фирмы «Айхелин» с предварительным подогревом в воздушной среде до 350 °С и переносом в нагретую от 610 °С до 620 °С печь с атмосферой из аммиака и экзогаза с соотношением 1 : 1 – 1 : 4, далее с охлаждением в масле или экзогазе. Контроль расхода технологических газов при азотировании осуществлялся с помощью ротаметров. Режим газового карбонитрирования опытной партии приведен в табл. 1.

Таблица 1

Режим газового карбонитрирования опытных образцов

Подача технологических газов, м³/ч			Температура зон печи, °С		Время выдержки в зонах печи, ч		Состав экзогаза и атмосферы печи, %				Температура масла, °С
Зона	Аммиак	Экзогаз	Зона	Температура	Зона	Время	Объект контроля	CO_2	CO	H_2	
1	2,7	6,5	1	610	1	2,5	Экзогаз	9,2	1,9	1,73	70
2	2,5	9,5	2	615	2	2,5	1-я зона печи	2,8	4,52	20,1	
							2-я зона печи	3,2	4,58	19,5	

[1] Далее будет также использоваться термин «газовое азотирование» как более распространенный, фактически проводится процесс газового карбонитрирования, т. е. совместного насыщения поверхности деталей азотом и углеродом в смеси аммиака и экзогаза.

Окончательное шлифование цилиндрической поверхности хромированных деталей проводили на бесцентровом шлифовальном станке «Джустина» до размера наружного диаметра $d = 48{,}07_{-0{,}01}$ мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали 2-х и 3 %-й водный раствор «Олинола». Полирование цилиндрической поверхности хромированных (после шлифования) и азотированных (после азотирования) до размера наружного диаметра $d = 48 + 0{,}074 + 0{,}036$ осуществлялось на полировальном станке фирмы «Каннинг» (Германия).

После полирования опытные (азотированные) образцы подвергали оксидированию в воздушной среде в камерной печи при температуре от 350 °С, 550 °С и 580 °С в течение от одного до шести часов. Измерения наружного диаметра до и после азотирования и после оксидирования проводили с помощью скобы рычажной повышенной точности с ценой деления 0,001 мм.

Коррозионную стойкость деталей оценивали по ГОСТ 9.308-85, согласно методу испытания при воздействии нейтрального соляного тумана. При этом о коррозионной стойкости судили по времени появления первых очагов коррозии и площади поражения коррозией после испытаний по прошествии определенного периода времени.

Для исследования структуры и толщин поверхностных слоев применяли *метод металлографического анализа*, при котором определяли толщины оксидного, карбонитридного слоев, диффузионного слоя (зоны внутреннего азотирования), микроструктуру карбонитридного и диффузионного слоев. Подготовка образцов для проведения металлографического анализа, а именно: вырезка темплета, заливка темплета в пластмассу, подготовка поверхности шлифов, осуществлялась на оборудовании фирмы «Струерс» (Дания). Травление поверхности шлифов проводили в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктуру слоев фиксировали с помощью микроскопа модели «Polyvar» фирмы «Reichert – JUNG» (Австрия) при увеличении 300 – 500х.

Толщины оксидного, карбонитридного слоев, слоя азотистого мартенсита и диффузионных зон (по травимости) измеряли под микроскопом с помощью линейки-окуляра при увеличении 500х. Твердость карбонитридного и оксидного слоев определяли с помощью твердомера фирмы «Кнуп» с нагрузкой 0,2 кг. Исследование распределения твердости по толщине зоны внутреннего азотирования (ЗВА) осуществлялось на поперечном не травленном шлифе с помощью твердомера фирмы «Карл Франк» (Германия).

Рентгеноструктурный анализ фазового состава поверхностных слоев на наличие фаз Fe_3N, Fe_2N, Fe_4N, альфа-твердого раствора азота в железе, а также окислов железа проводили с помощью дифрактомера «Дрон-1,5».

Стендовые испытания опытных образцов проводились в приведенной последовательности:

– проверка соответствия геометрических параметров;

– проверка на долговечность.

Определение соответствия геометрических размеров и шероховатости осуществлялось по ГОСТ 2.789-73 и ГОСТ 2.309-73 с помощью профилометра-профилографа фирмы «Taylor-Hobson» и «Талисфер-6». До и после стендовых испытаний проводились коррозионные испытания в камере соляного тумана по ГОСТ 9.3.08-85 и металлографический анализ толщины карбонитридного слоя по указанным ранее методикам.

Результаты (Results)

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты:

– металлографического исследования образцов после различных видов ХТО и оксидирования приведены в табл. 2 и 3, а также на рис. 1;

– метрологических и коррозионных испытаний (время появления первых очагов коррозии), образцов, обработанных по опытным режимам (азотирование и оксидирование с различной температурой оксидирования) в сравнении с базовым режимом (хромирование), представлены в табл. 4;

– коррозионных испытаний (время появления первых очагов коррозии) образцов, обработанных по опытным режимам с различным временем оксидирования в сравнении с образцами, подвергшимися хромированию, приведены в табл. 5;

– коррозионных испытаний (динамика поражения коррозией боковой и донной поверхностей) опытных (после газового азотирования и оксидирования в воздушной среде при 350 °С в течение шести часов) и контрольных (хромированных) образцов представлены в табл. 6 и на рис. 2.

Таблица 2

Результаты измерений толщин и твердости диффузионных слоев образцов после опытных режимов оксикарбонитрирования

Режим оксикарбонитрирования	Толщина			Твердость			
	оксидного слоя, мкм	карбонитридного слоя, мкм	зоны внутреннего азотирования, мм	оксидного слоя (максимальная), $HV_{0,01}$	карбонитридного слоя, $HV_{0,025}$	ЗВА (максимальная), HV_1	сердцевины, HV_1
ГА + О (350 °С)	4,5	30	0,3	300	700 – 1000	339	135
	3,0 – 4,0	30	0,4	135	800 – 1400	257	123
ГА + О (550 °С)	3,0 – 4,0	30	0,3	125	700 – 900	339	132
	3,0 – 4,0	25	0,35	135	970 – 1100	260	119
ГА + О (580 °С)	4,0	28	0,25	145	800 – 850	330	123

Таблица 3

Распределение твердости по толщине диффузионных слоев, микроструктура карбонитридного и диффузионного слоев

Вид термообработки	Номер образца	Распределение твердости HV_1 по толщине диффузионного слоя	Микроструктура	
			карбонитридного слоя	диффузионного слоя и ЗВА
ГА + О (350 °С)	7	339-313-305-269-263-219-210 (через 0,05 мм)	Азотист мартенсит 8 мкм, далее ярко выраженное реечное строение	Сохранена текстура, нитридные образования в виде весьма тонких игл и карбонитридов глобулярной формы строчечной ориентации
	12	257-214-205-186-175-178 (через 0,1 мм)	Азототистый мартенсит 10 мкм, далее столбчатое строение с перпендикулярной ориентацией к поверхности	Наличие текстуры, выделение из твердого раствора нитридов в виде тонких и мелких игл, карбонитриды
ГА + О (550 °С)	13	339-330-283-276-257-257-245-219 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 8 мкм столбчатого характера	Сохранена текстура, нитридные образования в виде весьма тонких игл и карбонитридов глобулярной формы строчечной ориентации
	18	260-234-214-214-205-205-169 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 10 мкм, далее столбчатого строения	Наличие текстуры, выделение из твердого раствора нитридов в виде тонких длинных игл, длина которых уменьшается по мере удаления от поверхности, карбиды
ГА + О (580 °С)	22	330-321-313-283-251-239-214 (через 0,05 мм)	Азотистый мартенсит 8 мкм, далее столбчатого строения	Наличие текстуры в приповерхностной зоне, выделение из твердого раствора азотистой фазы в виде игл, по границе зерен — карбиды

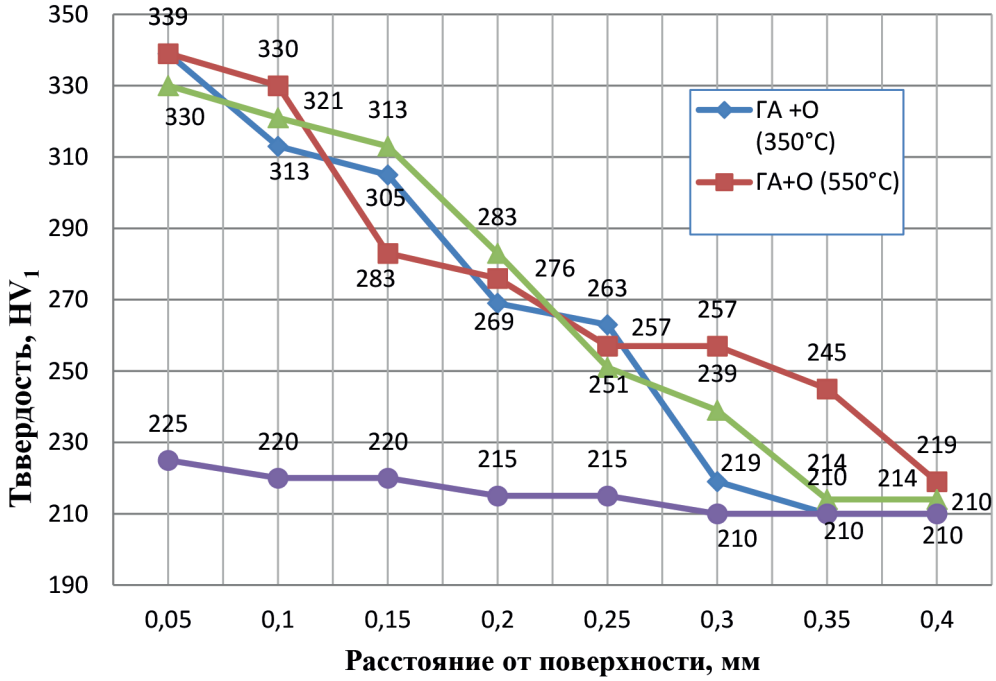


Рис. 1. Распределение твердости по толщине диффузионных слоев опытных (газовое азотирование и оксидирование) и контрольных (хромирование) образцов
Условные обозначения: ГА + О (350 °С), ГА + О (550 °С), ГА + О (580 °С) — соответственно газовое азотирование и оксидирование при температуре 350 °С, 550 °С, 580 °С

Таблица 4

Влияние температуры оксидирования азотированных образцов на размер наружного диаметра и время появления первых очагов коррозии (время оксидирования — 3 ч)

Вид обработки	Размер наружного диаметра, мм			Изменения размера наружного диаметра, мкм	Время до появления первых очагов коррозии, ч			
	до азотирования	после азотирования	после оксидирования		дно	боковая часть	канавка	среднее
Хромирование	–	–	–	–	4	24	Не определено	14
ГА + О (350 °С)	48,034	48,071	48,07	0	165	217	180	187
ГА + О (550 °С)	48,033	48,07	48,075	5,4	52	165	93	103
ГА + О (580 °С)	48,034	48,071	48,077	6,3	34	105	171	103

Примечания: ГА — газовое азотирование; О — оксидирование.

Таблица 5

Влияние длительности оксидирования азотированных образцов при 350 °С на время появления первых очагов коррозии

Вид обработки	Время оксидирования, ч	Время до появления первых очагов коррозии, ч		
		на донышке	на боковой поверхности	среднее значение
ГА + О (350 °С)	1	16,7	34,7	25,7
ГА + О (350 °С)	2	26,3	8	17,2
ГА + О (350 °С)	3	49	18,7	33,8
ГА + О (350 °С)	6	168	108	138
Хромирование		4	24	14

Таблица 6

Влияние опытной технологии (газовое азотирование и оксидирование при температуре 350 °С в течение шести часов) в сравнении с хромированием образцов на площадь поражения коррозией

Номер образца	Обработка	Площадь поражения коррозией в %, через период времени, ч					
		120		480		1128	
		Дно	Бок	Дно	Бок	Дно	Бок
8	Газовое азотирование и оксидирование (350 °С, 6 ч)	0	0	Следы	40	5	100
13		0	0	20	10	30	50
14		5	5	15	30	30	80
15		10	Следы	20	10	20	30
Среднее значение		3,8	1,2	13,8	22,5	21,2	65
2	Хромирование	100	100	100	100	100	100

На рис. 2 показаны поверхности образцов после 48-часовых испытаний в камере соляного тумана с различной предшествующей обработкой: твердое хромирование, оксикарбонитрирование с охлаждением после азотирования в масле, оксикарбонитрирование с охлаждением после азотирования в экзогазе.



Рис. 2. Поверхность образцов после 48-часовых испытаний в камере соляного тумана с предшествующей обработкой: *а* — твердое хромирование; *б* — оксикарбонитрирование, охлаждение после азотирования в масле; *в* — оксикарбонитрирование, охлаждение после азотирования в экзогазе

Результаты металлографического и рентгеноструктурного анализов образцов после газового азотирования и оксидирования при 350 °С в течение шести часов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты металлографического и рентгеноструктурного анализов образцов после газового азотирования и оксидирования при температуре 350 °С в течение шести часов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность

Толщина оксидного слоя, мкм	Структура оксидного слоя	Толщина карбонитридного слоя, мкм	Структура карбонитридного слоя	Твердость компактной части слоя, $HV_{0,025}$	Толщина ЗВА*, мм	Фазовый состав	
						оксидной пленки	зоны соединений
1	Плотная	16 – 18	Компактный, столбчатого строения	700	0,3 – 0,36	Fe_3O_4	$\varepsilon + \gamma^{1**}$

Примечания: *γ^1— зона внутреннего азотирования; **ε — карбонитрид Fe_3N; γ^1 — Fe_4N карбонитрид.

Результаты измерений геометрических размеров опытных образцов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты измерений геометрических размеров образцов, отобранных для стендовых испытаний на долговечность

Номер детали	Диаметр	Длина	Шероховатость
	Требования к окончательно изготовленной детали		
	$48^{-0,005}_{-0,028}$ / $48^{+0,074}_{+0,036}$	33 ± 0,2/ 48,95 ± 0,15 мм	Ra ≤ 0,2 / Ra ≤ 0,4 мкм
1	48,05	49,11	0,24
2	47,99	33,24	0,3

Результаты коррозионных испытаний опытных (газовое азотирование плюс оксидирование при 350 °С в течение шести часов) и контрольных (хромирование) образцов в состоянии достендовых испытаний на долговечность и образцов, прошедших стендовые испытания, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты коррозионных испытаний опытных и контрольных образцов до стендовых испытаний на долговечность и образцов, прошедших стендовые испытания

Номер образца, вид обработки	Режим	Время до появления первых очагов коррозии, ч		Площадь поражения коррозией в % через 6 ч					
				120		480		1128	
		дно	боковая поверхность	дно	боковая часть	дно	боковая часть	дно	боковая часть
До стендовых испытаний									
№ 2 — хромирование	Контрольный	4	24	100	100	100	100	100	100
№ 8 — ГА+О	Опытный	480	144	0	0	Следы	40	5	100
№ 13 — ГА + О	Опытный	144	192	0	0	20	10	30	50
№ 14 — ГА + О	Опытный	24	72	5	5	15	30	30	80
№ 15 — ГА + О	Опытный	24	24	10	Следы	20	10	20	30
После стендовых испытаний									
№ 1 — хромирование	Контрольный	24	4	100	100	100	100	100	100
№ 7 — ГА+О	Опытный	24	48	5	50	10	90	50	100
№ 10 — ГА + О	Опытный	1128	24	0	20	0	50	Следы	100
№ 11 — ГА + О	Опытный	24	24	Следы	10	5	20	20	30

Примечание. А + О* — газовое азотирование плюс оксидирование (350 °С, 6 ч).

Результаты металлографического анализа хромированного образца (№ 1) и образца с опытным покрытием (№ 7) после стендовых и коррозионных испытаний приведены в табл. 10 и на рис. 3.

Таблица 10

Результаты металлографического анализа опытных и контрольных (хромированных) образцов после стендовых испытаний на долговечность и испытаний коррозионной стойкости

Вид обработки	Состояние поверхности	Защитный слой			Диффузионный слой	Основа	
		толщина, мкм	твердость $H_{0,025}$	сплошность		твердость HV_1	микроструктура*
Хромирование	Покрыта продуктами коррозии красно-бурого цвета	20	1300	Отсутствует**	-	197	Ф + ЗП
Азотирование и оксидирование		34 – 36	950	Сохранена***	0,25 мм (по травимости)	110	Ф + П+Ц

* Ф — феррит; ЗП — зернистый перлит; П — перлит; Ц — цементит.
** В процессе испытаний на долговечность и коррозионную стойкость произошло нарушение сплошности хромового покрытия, разрушение поверхности образца с изменением рельефа и проникновение коррозионных язв внутрь металла.
*** В процессе испытаний на долговечность и коррозионную стойкость произошло разрушение поверхностной части карбонитридного слоя, в зоне максимального поражения коррозией сохранилась компактная часть слоя толщиной 4 мкм. Проникновение коррозии вглубь металла не выявлено.

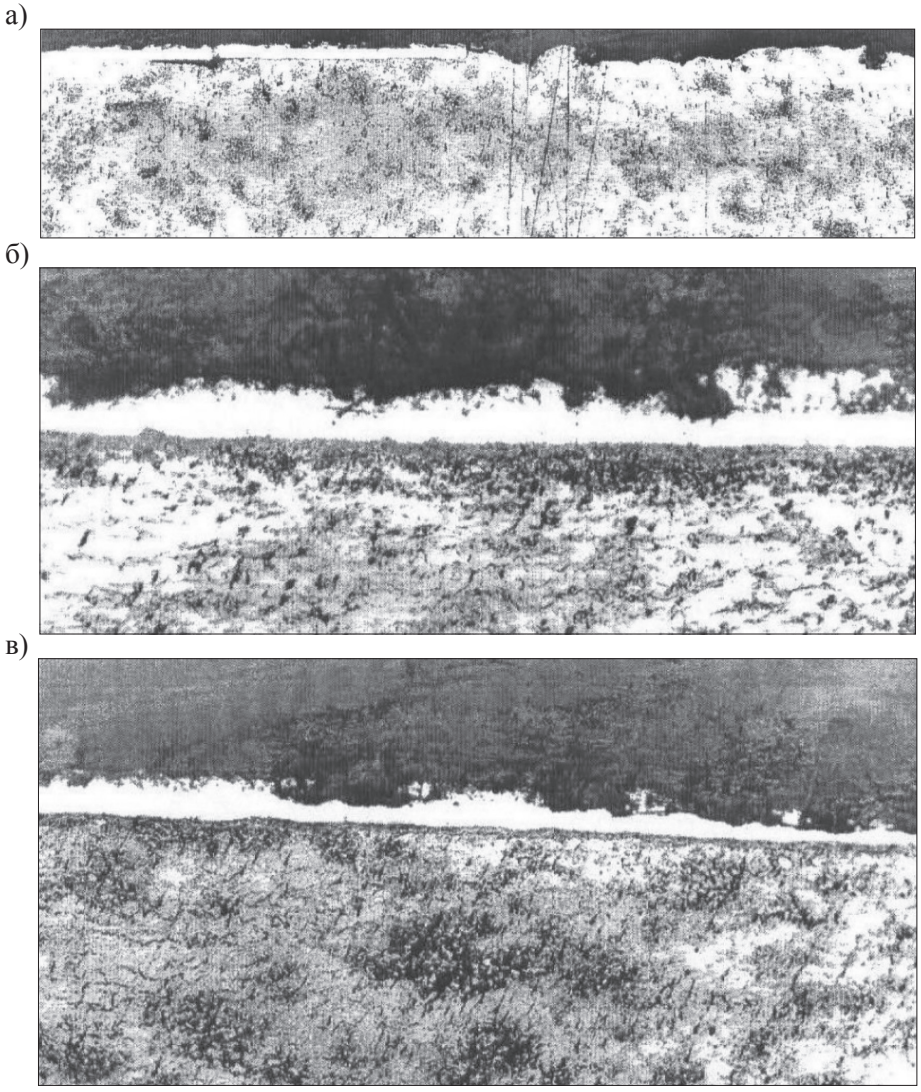


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя образцов после стендовых испытаний на долговечность и испытаний коррозионной стойкости: *а* — контрольный образец (хромирование) после 120 ч коррозионных испытаний, 200х; *б* — опытный образец (газовое азотирование и оксидирование, 350 °С, 6 ч) после 1128 ч коррозионных испытаний, 320х; *в* — зона максимального поражения коррозией опытного образца после 1128 ч коррозионных испытаний, 200х

Результаты измерений наружного диаметра и шероховатости цилиндрической поверхности образцов до и после полирования и после оксидирования приведены в табл. 11 и на рис. 4.

Таблица 11

Результаты измерений наружного диаметра и шероховатости цилиндрической поверхности образцов до и после полирования*

Номер детали	Наружный диаметр, мм					Шероховатость Ra, мкм				
	До полирования	После полирования	Разность граф 2 и 3	После оксидирования	Разность граф 3 и 5	До полирования	После полирования	Разность граф 7 и 8	После оксидирования	Разность граф 8 и 10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	48,0613	48,0575	0,00375	48,056	0,0015	0,516	0,168	0,348	0,127	0,041
5	48,070	48,0613	0,00875	48,06	0,0012	0,924	0,192	0,732	0,168	0,024
6	48,0663	48,060	0,00625	48,049	0,0012	0,656	0,176	0,48	0,1254	0,051
9	48,0713	48,0663	0,005	48,0663	0,0	0,746	0,188	0,558	0,1678	0,002
16	48,0625	48,0575	0,005	48,0575	0,0	0,514	0,128	0,386	0,1058	0,022
17	48,0638	48,0588	0,005	48,0588	0,0	0,54	0,142	0,398	0,1394	0,026
18	48,0638	48,0563	0,0075	48,0575	0,0012	0,482	0,18	0,302	0,1542	0,026
19	48,0626	48,0563	0,00625	48,0563	0,0	0,64	0,172	0,468	0,1602	0,012

Примечание. В таблице приведены средние значения результатов, состоящих из четырех измерений.

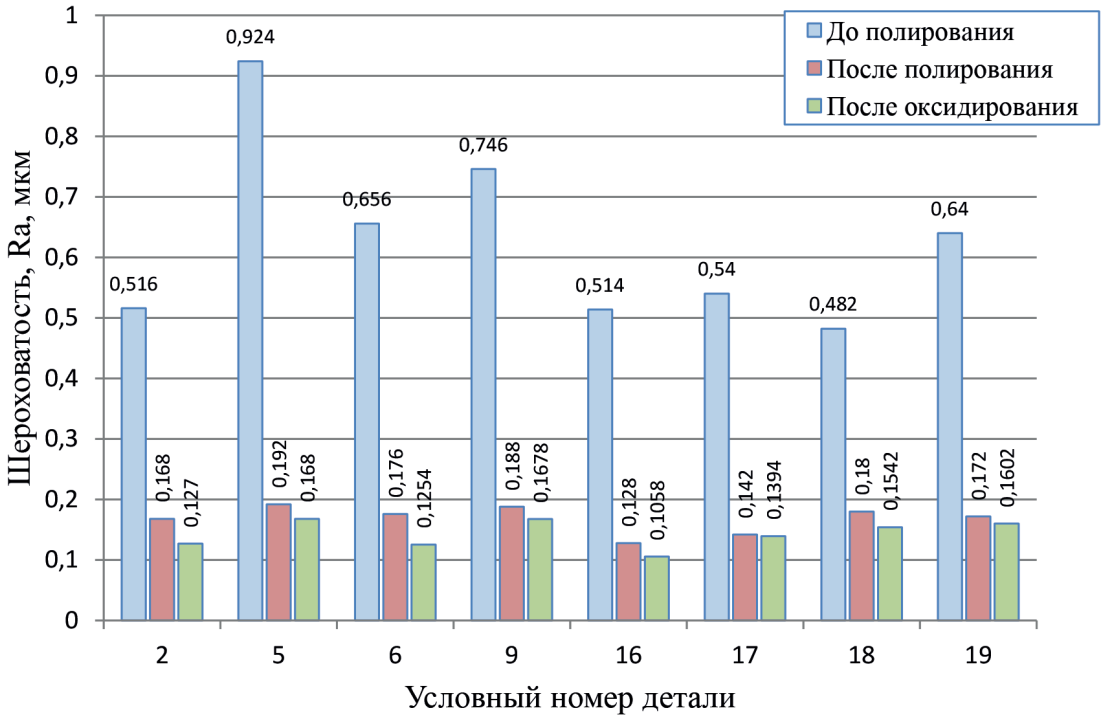


Рис. 4. Влияние полирования и оксидирования на шероховатость опытных образцов

Обсуждение (Discussion)

Анализ результатов исследования влияния температуры и длительности оксидирования азотированных образцов на геометрические параметры и коррозионную стойкость. На образцах после газового азотирования и оксидирования по различным вариантам получены слои, состоящие из поверхностного карбонитридного слоя толщиной 20 – 30 мкм, твердостью от 680 до 1400 $HV_{0,025}$, нижележащего слоя азотистого мартенсита толщиной от 8 до 10 мкм и зоны внутреннего азотирования толщиной от 0,25 до 0,4 мм. При этом не выявлено влияния температуры оксидирования на толщину и твердость слоя соединений и зоны внутреннего азотирования.

Следует отметить более высокую твердость опытных диффузионных слоев (после азотирования и оксидирования (в среднем 330 HV_1 на расстоянии 0,05 мм от поверхности) по сравнению с хромированными (225 HV_1). Зона соединений характеризуется столбчатым строением. В зоне внутреннего азотирования преобладают выделения нитридов из твердого раствора в виде игл. В приповерхностном слое сохраняется текстура исходного металла.

Анализ результатов метрологических и коррозионных испытаний образцов (см. табл. 4), обработанных в опытных режимах (азотирование и оксидирование) с различной температурой оксидирования (350 °С, 550 °С и 580 °С), в сравнении с контрольным режимом (хромирование), показал следующее:

1. При низкотемпературном оксидировании (350 °С) величина диаметра практически не изменяется. С повышением температуры оксидирования увеличивается прирост диаметра. Оксидирование при температуре 580 °С увеличивает диаметр на 5,4 мкм в среднем, оксидирование при температуре 580 °С — на 6,3 мкм.

2. Коррозионная стойкость опытных образцов после газового азотирования и оксидирования значительно превышает стойкость контрольных хромированных образцов. Так, время появления первых очагов коррозии на хромированных образцах в среднем составляет 14 ч, на опытных — от 103 до 187 ч.

3. С повышением температуры оксидирования от 350 до 550 – 580 °С коррозионная стойкость образцов снижается в среднем от 187,5 до 103,5 ч, т. е. на 45 %. Таким образом, на основании анализа полученных результатов оптимальной температурой оксидирования является 350 °С.

Анализ приведенных в табл. 5 данных показывает, что с увеличением времени оксидирования азотированных образцов от 1 до 6 ч происходит увеличение их коррозионной стойкости. Так, при оксидировании в течение 1 – 3 ч первые очаги коррозии на боковой и донной поверхности появляются через 8 – 49 ч. При оксидировании в течение шести часов первые очаги коррозии появляются через 108 – 168 ч. Хромированные образцы показали меньшую стойкость по сравнению с азотированными и оксидированными — на их поверхности коррозия начинается через 4 – 24 ч.

Анализ результатов (см. табл. 7) показал, что скорость распространения коррозии на поверхности хромированных образцов значительно выше, чем на поверхности азотированных и оксидированных (350 °С, 6 ч). После 120 ч испытания вся поверхность хромированных образцов была поражена коррозией, а на опытных образцах за это же время было поражено не более 10 % всей поверхности. Даже после 1128 ч испытаний лишь один из четырех опытных образцов был полностью поражен коррозией, на остальных трех площадь, занятая коррозией, составила 30 – 80 %. Высокая скорость распространения коррозии на хромированных образцах можно объяснить тем, что слой хрома является катодным покрытием по отношению к стали. Это способствует быстрому развитию коррозии после появления первых точек коррозии в атмосферных условиях.

Таким образом, режим химико-термической обработки, состоящий из газового азотирования и оксидирования при 350 °С в течение шести часов обеспечивает более высокую коррозионную стойкость образцов в сравнении с контрольными — хромированными.

Анализ результатов стендовых испытаний опытных образцов. Анализ данных результатов металлографического и рентгеноструктурного исследования опытных образцов (см. табл. 7) показал, что для стендовых испытаний отобраны образцы с толщиной оксидного слоя, равной 1 мкм, толщиной карбонитридного слоя —16 – 18 мкм, твердостью карбонитридного слоя — $HV_{0,025}$700, толщиной зоны внутреннего азотирования — 0,3 – 0,36 мм. Фазовый состав оксидной пленки представляет из себя магнетит Fe_3O_4, слой соединений состоит из карбонитридов Fe_3N и Fe_4N. Таким образом, опытные образцы, отобранные для стендовых испытаний, соответствуют по толщине защитного слоя требованиям контрольных хромированных.

Анализ результатов измерения наружного диаметра и шероховатости рабочей поверхности образцов, отобранных для стендовых испытаний (см. табл. 8), показал, что шероховатость опытного образца (№ 1) после газового азотирования и оксидирования при 350 °С в течение шести часов завышена и Ra составляет 0,3 мкм вместо максимальной Ra = 0,2 мкм. Шероховатость опытного образца (№ 2) соответствует требованиям чертежа. Геометрические параметры опытных образцов (диаметр и длина) в обоих случаях соответствуют заданным требованиям. Этот факт объясняется тем, что опытные образцы не подвергались полированию, в то время как контрольные после хромирования подвергались окончательному шлифованию.

Из табл. 9 и 10, а также рис. 2 и 3 видно, что после испытания на коррозионную стойкость образцов, прошедших стендовые испытания на долговечность, хромированные образцы закорродировали полностью через 120 ч с нарушением сплошности хромового покрытия и проникновением коррозии в металл. Опытные образцы после газового азотирования и оксидирования закорродировали полностью только через 1128 ч, при этом нарушения сплошности карбонитритного слоя и проникновения коррозии в металл не выявлено. Для всех опытных образцов характерна низкая скорость распространения коррозии в условиях испытаний.

Анализ влияния операции полирования на шероховатость опытных образцов. Анализ данных, приведенных в табл. 11 (графы 2 – 4 и 7 – 9) и на рис. 4, показывает, что после полирования азотированных образцов (перед оксидированием) шероховатость наружной цилиндрической поверхности Ra составляет 0,12 – 0,19 мкм, что соответствует заданным требованиям (Ra ≤ 0,2 мкм). Величина наружного диаметра в результате полирования уменьшилась на 4 – 9 мкм, что могло привести к удалению окисной пленки с поверхности образцов, играющей значительную роль в повышении коррозионной стойкости деталей.

Анализ данных (графы 5, 6, 10, 11 табл. 11, рис. 4) показывает, что после оксидирования предварительно отполированных образцов, шероховатость снижается и Ra = 0,10 – 0,16 мкм, что также соответствует установленным требованиям. Снижение шероховатости образцов в процессе оксидирования, вероятно, связано с заполнением окислами впадин поверхностного рельефа.

Заключение (Conclusion)

Проведенные исследования, направленные на разработку альтернативного твердому хромированию способа поверхностного упрочнения деталей судовых технических средств, показали, что максимальной коррозионной стойкостью, в 6 – 10 раз превосходящей стойкость контрольных (хромированных) образцов, обладают опытные образцы после газового карбонитрирования с охлаждением в масле и оксидирования в воздушной среде при 350 °С в течение шести часов.

В результате стендовых испытаний было установлено, что опытные образцы после газового азотирования и оксидирования соответствуют установленным требованиям по долговечности и не уступают контрольным — хромированным. Оба типа покрытия в условиях стендовых испытаний в равной степени не защищают образцы от механического износа наружной цилиндрической поверхности.

После испытаний коррозионной стойкости образцов, прошедших стендовые испытания на долговечность, установлено, что контрольный (хромированный) образец закорродировал полностью через 120 ч с нарушением сплошности хромового покрытия и проникновением коррозии в металл. Опытный образцы через 1128 ч закорродировали не по всей наружной поверхности, при этом нарушения сплошности карбонитридного слоя и проникновения коррозии в металл не выявлено.

Установлено, что шероховатость поверхности азотированных образцов после полирования уменьшается с Ra = 0,3 мкм до Ra = 0,12 – 0,19 мкм, что соответствует установленным требованиям (Ra ≤ 0,2 мкм); величина наружного диаметра в результате полирования уменьшается на 4 – 9 мкм; оксидирование при 350 °С в течение шести часов, выполненное после полирования, приводит к снижению шероховатости до Ra = 0,10 – 0,16 мкм, при этом величина наружного диаметра не изменяется.

Разработана альтернативная твердому хромированию технология поверхностного упрочнения деталей — технология оксикарбонитрирования, включающая следующие операции:

– стандартная механическая обработка;

– предварительный нагрев в воздушной атмосфере и выдержка в течение 60 мин при температуре от 350 °С до 400 °С;

– кратковременное газовое карбонитрирование в атмосфере аммиака и экзогаза при их соотношении от 1 : 1 до 1 : 4 при 600 – 630 °С с охлаждением в масле или экзогазе;

– полирование в заданный размер;

– оксидирование в воздушной среде при температуре в диапазоне от 300 °С до 400 °С продолжительностью до шести часов.

В результате использования данной технологии возможно получение деталей с повышением коррозионной стойкости при снижении деформаций, а также увеличение их размерной точности. Разработанная технология оксикарбонитрирования после соответствующей адаптации может быть использована при изготовлении деталей судового машиностроения вместо традиционного твердого хромирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погодаев Л. И.* Надежность судового оборудования: монография / Л. И. Погодаев, А. А. Кузьмин, Ю. К. Лопарев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 124 с.

2. *Хмелевская В. Б.* Выбор технологий и материалов для повышения надежности судового оборудования: монография / В. Б. Хмелевская, А. А. Кузьмин. — СПб.: СПГУВК, 2005. — 211 с.

3. *Роговський І. Л.* Ефективність відновлення деталей плунжерних пар паливних насосів сільскогосподарської техніки / І. Л. Роговський, Л. Л. Роговський // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — 2015. — № 212-1. — С. 163–172.

4. *Эшкабилов Х. К.* Регулируемая технология нитрооксидирования низколегированной стали / Х. К. Эшкабилов, Ш. А. Бердиев // International Scientific and Practical Conference World science. — 2016. — Т. 1. — № 2 (6). — С. 69–74.

5. *Зинченко В. М.* Азотный потенциал: современное состояние, проблемы и концепции развития / В. М. Зинченко [и др.]; под ред. Б. А. Прусакова. — М.: ФГПУ «Изд-во Машиностроение», 2003. — 90 с.

6. *Коган Я. Д.* Оксиазотирование металлических изделий / Я. Д. Коган, Х. К. Ешкабилов // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 6. — С. 10–16.

7. *Winning J.* Neues Verfaren und Anlagen zum Nitrieren mit E-verbindungesscyicht / J. Winning // HTM. — 1974. — Vol. 29. — No. 1. — Pp. 42–49.

8. *Герасимов С. А.* Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 520 с.

9. *Герасимов С. А.* Особенности формирования структуры и трибологических свойств азотированных сталей и сплавов / С. А. Герасимов, Л. И. Куксенова, М. С. Алексеева // Вестник научно-технического развития. — 2017. — № 7 (119). — С. 3–17.

10. Nanostractured Coating / Edited by A. Gavaleiro, J. T. De Hosson. — Berlin: Springer-Verlag, 2006. — 648 p.

11. *Шевчук А. М.* Влияние азотирования на структуру и свойства сталей / А. М. Шевчук, Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой науч.-практ. конф. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 421–425.

12. *Кусманов С. А.* Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей электролитно-плазменным насыщением азотом и углеродом / С. А. Кусманов, Е. П. Гришина, П. Н. Белкин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 2 (740). — С. 52–59.

13. *Ковальчук А. В.* Комплексное поверхностное упрочнение стальных изделий / А. В. Ковальчук, С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, Г. А. Ткаченко // Литье и металлургия. — 2014. — № 4 (77). — С. 144–150.

14. Пат. 1780340, АС СССР, МПК С23С 8/26. Способ химико-термической обработки стальных деталей / Н. В. Богданова, А. К. Тихонов, Н. И. Сардаев [и др.]; опубл. 27.03.1995.

15. Пат. № 2478137, Российская Федерация, МПК C23C 8/34. Способ химико-термической обработки стальных изделий / Н. В. Богданова, А. С. Кочергин, Е. М. Евграфов; заяв. и патентообл. ОАО «АВТОВАЗ». — № 2011126851/02; Заявлено 29.06.2011; опубл. 10.01.2013. — Бюл. № 9.

16. *Коробочка О. Н.* Внедрение оксикарбонитрирования взамен твердого хромирования / О. Н. Коробочка, О. Г. Чернета, Р. Г. Волощук // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Автомобиле- и тракторостроение. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. — № 8 (1117). — С. 127–132.

REFERENCES

1. Pogodaev, L.I., A.A. Kuz'min, and Yu.K. Loparev. *Nadezhnost' sudovogo oborudovaniya. Monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.

2. Khmelevskaya, V.B., and A.A. Kuz'min. *Vybor tekhnologii i materialov dlya povysheniya nadezhnosti sudovogo oborudovaniya. Monografiya*. SPb.: SPGUVK, 2005.

3. Rogovs'kii, I.L., and L.L. Rogovs'kii. "Efektivnist' vidnovlennya detalei plunzhernikh par palivnikh nasosiv sil'skogospodars'koï tekhniki." *Naukovii visnik NUBiP Ukraïni. Seriya: Tekhnika ta energetika APK* 212-1 (2015): 163–172.

4. Eshkabilov, Kh.K., and Sh.A. Berdiev. "Reguliruemaya tekhnologiya nitrooksidirovaniya nizkolegirovannoi stali." *International Scientific and Practical Conference World science* 1.2(6) (2016): 69–74.

5. Zinchenko, V.M., et al. *Azotnyi potentsial: sovremennoe sostoyanie, problemy i kontseptsii razvitiya.* Edited by B.A. Prusakov. M.: FGPU «Izd-vo Mashinostroenie», 2003.

6. Kogan, Ya.D., and X.K. Eshkabilov. "Oxynitriding of metal parts." *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* 6 (2006): 10–16.

7. Winning, J. "Neues Verfaren und Anlagen zum Nitrieren mit E-verbindungesscyicht." *HTM* 29.1 (1974): 42–49.

8. Gerasimov, S.A., L.I. Kuksenova, and V.G. Lapteva. *Struktura i iznosostoikost' azotirovannykh konstruktsionnykh stalei i splavov.* M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014.

9. Gerasimov, S.A., L.I. Kuksenova, and M.S. Alekseeva. "Peculiarities of structure and tribological properties formation of the nitrided steel and alloy." *Bulletin of Science and Technical Development* 7(119) (2017): 3–17.

10. Gavaleiro, A., and J.T De Hosson. *Nanostractured Coating.* Berlin: Springer-Verlag, 2006.

11. Shevchuk, A.M., D.A. Negrov, and V.Yu. Putintsev. "Vliyanie azotirovaniya na strukturu i svoistva stalei." *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 421–425.

12. Kusmanov, S.A., E.P. Grishina, P.N. Belkin, Yu.V. Kusmanova, and N.O. Kudryakova. "Raising the corrosion resistance of low-carbon steels by electrolytic-plasma saturation with nitrogen and carbon." *Metal Science and Heat Treatment* 59.1-2 (2017): 117–123. DOI: 10.1007/s11041-017-0114-0

13. Kovalchuk, A.V., S.V. Konstantinov, F.F. Komarov, and G.A. Tkachenko. "Complex surface hardening of steel articles." *Foundry production and metallurgy* 4(77) (2014): 144–150.

14. Bogdanova, N.V., A.K. Tikhonov, N.I. Sardaev, M.A. Krishtall, and A.A. Talantsev. USSR 1780340 Al, IPC S23S 8/26. Sposob khimiko-termicheskoi obrabotki stal'nykh detalei. Publ. 27 March 1995.

15. Bogdanova, N.V., A.S. Kochergin, and E.M. Evgrafov. RU 2 478 137 C2, IPC C 23 C 8/34. Sposob khimiko-termicheskoi obrabotki stal'nykh izdelii. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2013.

16. Korobochka, O.N., O.G. Cherneta, and R.G. Voloshchuk. "Vnedrenie oksikarbonitrirovaniya vzamen tverdogo khromirovaniya." *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp. : Avtomobile- i traktorostroenie*. № 8 (1117). Khar'kov: NTU «KhPI», 2015. 127–132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Богданова Наталья Васильевна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *nabo146@mail.ru*, *kaf_tmm@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bogdanova, Natal'ya V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *nabo146@mail.ru*, *kaf_tmm@gumrf.ru*

Кузьмин Александр Алексеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kuzminaa@gumrf.ru*
Шнуренко Анатолий Алексеевич —
доктор технических наук, коммерческий директор
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»
198184, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Канонерский остров, 41У
e-mail: *dock@ksz.spb.ru*

Kuz'min, Aleksandr A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kuzminaa@gumrf.ru*
Shnurenko, Anatolii A. —
Dr. of Technical Sciences
Joint Stock Company Kanonersky Shiprepairing Yard
41 Kanonerskii ostrov, St. Petersburg, 198184,
Russian Federation
e-mail: *dock@ksz.spb.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-379-389

THE CHOICE OF COOLING PARAMETERS FOR MARINE DIESEL ENGINES

O. K. Bezjukov, V. A. Zhukov, A. A. Pulyaev

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

The main trend in the development of modern engine building is the acceleration of internal combustion engines at an average effective pressure and boost pressure. This leads to an increase in thermal and mechanical loads on the main parts of the engine, the increase in vibration of diesel engines, which necessitates the improvement of systems that ensure reliable operation of the engine in the entire range of operating conditions, especially lubrication and cooling systems. One of the factors negatively affecting the reliability of engines with liquid cooling systems are erosion and corrosion damage to the elements of the systems, especially the outer surfaces of the cylinder sleeves, washed by the coolant. The article is devoted to the actual problem — the choice of cooling parameters of modern internal combustion engines with a high level of acceleration and advanced engines. The method of choice of cooling parameters includes the identification of the most important of them and the reasonable determination of the preferred values of these parameters, taking into account the requirements of efficiency and reliability of marine diesel engines. To solve this problem, an algorithm is proposed that takes into account the design characteristics of the engine, the parameters of the workflow, cooling modes. The article presents the calculation formulas that allow to implement the proposed algorithm. The temperature and pressure in the cooling system and the hydrogen index of the coolant are set as the main cooling parameters affecting the intensity of erosion-corrosion damage and the efficiency of the diesel engine. The results of the calculations allow to estimate the influence of these factors on the intensity of erosion-corrosion damage and specific fuel consumption, as well as to recommend the most preferred cooling parameters. The conclusions made on the basis of the calculations are confirmed by the results of motor tests. The article offers technical solutions that allow automatic control of cooling parameters of marine diesel engines.

Keywords: marine internal combustion engines, liquid cooling system, erosion-corrosion, the cooling parameters, the algorithm of selection of the cooling parameters, the properties of the coolant.

For citation:
Bezjukov, Oleg K., Vladimir A. Zhukov, and Andrej A. Pulyaev. "The choice of cooling parameters for marine diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 379–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-379-389.

УДК 621.436

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

О. К. Безюков, В. А. Жуков, А. А. Пуляев

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

Основной тенденцией развития современного двигателестроения является форсирование двигателей внутреннего сгорания по среднему эффективному давлению и давлению наддува. Это приводит к повышению тепловых и механических нагрузок на основные детали двигателя, росту виброактивности дизелей, что обусловливает необходимость совершенствования систем, обеспечивающих надежную работу двигателя во всем диапазоне эксплуатационных режимов, прежде всего — систем смазки и охлаждения. Одним из факторов, отрицательно влияющих на надежность двигателей с жидкостными системами охлаждения, являются эрозионно-коррозионные разрушения элементов систем, прежде всего, наружных поверхностей цилиндровых втулок, омываемых охлаждающей жидкостью. Статья посвящена актуаль-

ной проблеме выбора параметров охлаждения современных двигателей внутреннего сгорания с высоким уровнем форсированности и перспективных двигателей. Методика выбора параметров охлаждения включает выявление наиболее значимых из них и обоснованное определение предпочтительных значений данных параметров с учетом требований экономичности и надежности судовых дизелей. Для решения поставленной задачи предложен алгоритм, учитывающий конструктивные характеристики двигателя, параметры рабочего процесса и режимы охлаждения. В статье приводятся расчетные формулы, позволяющие реализовывать предложенный алгоритм. В качестве основных параметров охлаждения, влияющих на интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений и экономичность дизеля, установлены температура и давление в системе охлаждения и водородный показатель охлаждающей жидкости. Результаты проведенных расчетов позволяют оценить влияние указанных факторов на интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений и удельный расход топлива, а также рекомендовать наиболее предпочтительные параметры охлаждения. Выводы, сделанные на основании проведенных расчетов, подтверждаются результатами моторных испытаний. В статье предложены технические решения, позволяющие осуществлять автоматическое управление параметрами охлаждения судовых дизелей.

Ключевые слова: судовые двигатели внутреннего сгорания, жидкостные системы охлаждения, эрозионно-коррозионные разрушения, параметры охлаждения, алгоритм выбора параметров охлаждения, свойства охлаждающей жидкости.

Для цитирования:
Безюков О. К. Выбор параметров охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, А. А. Пуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 379–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-379-389.

Введение

Обновление морского и речного флота Российской Федерации требует создания новых и модернизации находящихся в эксплуатации судовых дизелей, к которым предъявляются все более высокие требования по надежности, экономичности и экологической безопасности. Основной тенденцией мирового двигателестроения является достижение высоких экономических показателей главным образом за счет повышения давления наддува и среднего эффективного давления [1], [2], что неизбежно приводит к повышению тепловой и механической напряженности узлов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), возрастанию нагрузок на его детали, прежде всего, на детали цилиндропоршневой группы [3], [4]. Для современных форсированных судовых ДВС характерным является сокращение разрыва между действующими значениями тепловых и механических нагрузок и их допустимыми пределами. Обеспечение надежной работы двигателя возможно лишь при условии поддержания безопасного температурного уровня деталей цилиндропоршневой группы, которое осуществляется системой охлаждения двигателя. Судовые дизели охлаждаются многоконтурными жидкостными системами охлаждения, которые обеспечивают теплоотвод требуемой интенсивности [5].

Системы охлаждения современных и перспективных поршневых и комбинированных двигателей должны обеспечивать оптимальное и стабильное тепловое состояние деталей и узлов. Оптимальным следует считать такой температурный уровень, при котором материалы деталей сохраняют свои прочностные свойства, моторные масла — высокую смазывающую и несущую способность, а потери теплоты через систему охлаждения минимальны. На эксплуатационные показатели двигателя оказывает отрицательное влияние как недостаточное, так и излишнее охлаждение. Перегрев двигателя вызывает ухудшение наполнения цилиндров воздушным зарядом, неполное сгорание топлива и его повышенный расход, нарушение условий жидкостного трения, возникновение повышенных износов и задиров трущихся поверхностей в узлах трения, повышенный расход масла на угар, снижение прочностных свойств материалов и появление термоусталостных разрушений. Переохлаждение двигателя приводит к чрезмерному повышению вязкости масла и вследствие этого возрастанию механических потерь, снижению эффективного КПД двигателя, а также к ухудшению смесеобразования и воспламенения, переносу процесса сгорания на линию расширения и повышению расхода топлива. Переохлаждение ДВС имеет место при работе на режимах холостого хода и малых нагрузок.

Процессы теплоотвода в жидкостных системах охлаждения сопровождаются эрозионно-коррозионными разрушениями элементов систем и образованием отложений на теплоотдающих поверхностях. Такие разрушения характерны для цилиндровых втулок наиболее распространенных марок судовых дизелей [6]. С увеличением среднего эффективного давления и снижением удельной массы двигателей проблема кавитационных и коррозионных разрушений в полостях охлаждения сохраняет свою актуальность. Указанные процессы крайне негативно сказываются на надежности и эффективности ДВС. Коррозия в системах охлаждения является причиной образования шлама, который оседает преимущественно в зонах с низкой скоростью течения. Под образующимися отложениями активно протекает подшламовая коррозия. Трубопроводы систем охлаждения, изготовленные из оцинкованной или футерованной стали, подвергаются кроме подшламовой равномерной коррозии, сопровождающейся уменьшением толщины стенок трубопроводов и образованием отложений продуктов коррозии, уменьшающих проходные сечения. Значительное уменьшение проходных сечений трубопроводов отрицательно сказывается на работе системы охлаждения и может привести к перегреву ДВС.

Совершенствование жидкостных систем охлаждения судовых дизелей предполагает решение трех взаимосвязанных задач:

1) определение параметров охлаждения, оказывающих наиболее существенное влияние на надежность и эффективность работы двигателя;

2) обоснование предпочтительных значений выбранных параметров;

3) разработка устройств, обеспечивающих автоматический контроль и регулирование параметров охлаждения.

Целью проведенных исследований являлось определение предпочтительных параметров охлаждения судовых дизелей с точки зрения обеспечения экономичности и надежности их работы.

Методы и материалы

В работе [7] обоснован подход, при котором функционирование жидкостных систем охлаждения (СО) ДВС характеризуется двумя группами параметров: режимных и водно-химических. К первой группе относятся температура охлаждающей жидкости $T_{ОЖ}$ и давление в системе охлаждения $p_{СО}$, скорость ее циркуляции $v_{ОЖ}$, перепад температур в контуре охлаждения ΔT, определяющие плотность теплового потока $q_{охл}$ через охлаждаемые поверхности, и количество отводимой через систему охлаждения теплоты $Q_{охл}$. Основными следует считать температуру охлаждающей жидкости $T_{ОЖ}$ и связанное с ней, в случае высокотемпературного охлаждения, давление в системе охлаждения $p_{СО}$. Установлено, что для каждого типа двигателей существует определённый сравнительно узкий диапазон температур в рубашке охлаждения ДВС, который обеспечивает сочетание высоких мощностных и экономических показателей с достаточной долговечностью и надёжностью. Такую температуру принято называть *оптимальной*. Для современных комбинированных ДВС эта температура находится в пределах 85 … 110 °С [8], [9].

Основной характеристикой водно-химического режима, определяющей интенсивность кавитационно-коррозионных разрушений, является водородный показатель pH охлаждающей жидкости [10], [11]. Наиболее эффективным способом регулирования водородного показателя охлаждающих жидкостей ДВС является введение присадок в систему охлаждения [12].

Алгоритм решения задачи совершенствования режимных и водно-химических параметров охлаждения представлен на рис. 1. В качестве исходных данных при выполнении расчетов используются конструктивные характеристики двигателя, параметры охлаждения, варьируемые в процессе расчета, параметры рабочего цикла двигателя, а также эмпирические коэффициенты, приводимые в литературных источниках.

На первом этапе рассчитывались параметры, оказывающие определяющее влияние на теплофизические процессы, протекающие в полостях охлаждения: давление p_s, соответствующее заданной температуре охлаждающей жидкости $T_{охл}$, средний удельный тепловой поток через бо-

ковую поверхность втулки цилиндра $q_{ср}$, средняя скорость поршня $c_п$. Для расчета использовались эмпирические формулы.

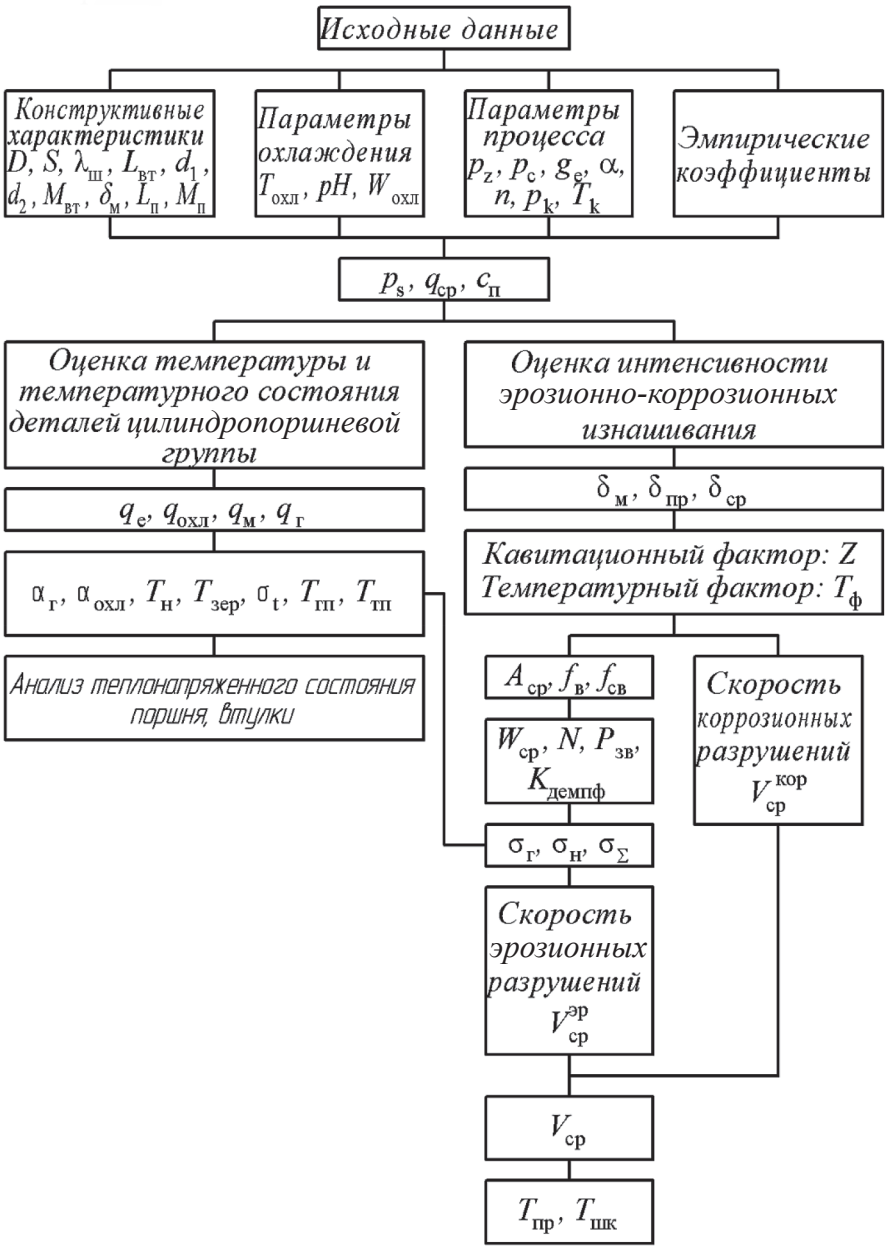


Рис. 1. Алгоритм оценки теплового состояния и скорости эрозионно-коррозионных разрушений

Давление насыщения охлаждающей воды [14]:

– при температуре охлаждающей воды менее 373 °К

$$P_s = 1{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(0{,}042 \cdot T_{охл}); \quad (1)$$

– при температуре охлаждающей воды более 373 °К

$$P_s = 1{,}08 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(0{,}0308 \cdot T_{охл}). \quad (2)$$

Температура насыщения охлаждающей воды

$$T_s = 447{,}6 \cdot T_{охл}^{0,8}. \quad (3)$$

Средний удельный тепловой поток через боковую поверхность втулки цилиндра определялся по формуле, предложенной в работе [14]:

$$q_{\text{ср}} = 148 \cdot \frac{353}{T_{\text{охл}}} \cdot C_{\text{м}}^{0,566} \cdot P_{\text{e}} \cdot g_{\text{e}} \cdot T_{\text{int}} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}} \cdot \frac{1}{(P_s \cdot P_{\text{int}})^{0,434}}. \quad (4)$$

На втором этапе вычислений по методике, описанной в работе [13], определялись составляющие теплового баланса ($q_{\text{е}}$, $q_{\text{охл}}$, $q_{\text{ог}}$, $q_{\text{м}}$), коэффициенты теплоотдачи от рабочего тела к стенке цилиндра и от стенки к охлаждающей жидкости ($\alpha_{\text{г}}$, $\alpha_{\text{охл}}$), температуры наружной и внутренней поверхностей гильзы цилиндров, головки и тронка поршня ($T_{\text{н}}$, $T_{\text{зер}}$, $T_{\text{ГП}}$, $T_{\text{ТП}}$), напряжения в цилиндровой втулке, подверженной эрозионно-коррозионным разрушениям, под действием газовых сил, термических напряжений, дополнительных контактных напряжений ($\sigma_{\text{г}}$, σ_{t}, $\sigma_{\text{н}}$).

Для оценки интенсивности эрозионно-коррозионного изнашивания наружной поверхности цилиндровых втулок на основании конструкторской документации с использованием эмпирических формул определялись монтажные, предельные и средние зазоры между зеркалом втулки цилиндра и тронком поршня ($\delta_{\text{м}}$, $\delta_{\text{пр}}$, $\delta_{\text{ср}}$), круговая частота свободных колебаний втулки (ω), числа свободных и вынужденных колебаний цилиндровой втулки за один рабочий цикл двигателя ($f_{\text{св}}$, $f_{\text{в}}$). Полученные значения использовались для расчета:

– коэффициента демпфирования ударного воздействия поршня при перекладке масляной пленкой

$$K_{\text{демпф}} = \exp(-t_d \cdot 0,5 \frac{\delta_{\text{ср}}}{\delta_{\text{пр}}}), \quad (5)$$

где t_d= 1000 при $n < 16,5$ с$^{-1}$ и t_d=1 250 при $n \geq 16,5$ с$^{-1}$;

– среднего виброускорения втулки за период ее эрозионного изнашивания до предельного состояния:

$$W_{\text{ср}} = 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{\delta_{\text{ср}}^2 \cdot n^2 \cdot N}{D_{\text{с}}} \cdot \left(\frac{L_{\text{вт}}}{L_{\text{п}}}\right)^{1,1} \cdot \left(\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{вт}}}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{P_z}{P_{\text{с}}}\right)^{0,11} \cdot K_{\text{демпф}}; \quad (6)$$

– средней амплитуды колебаний втулки за период ее эрозионного изнашивания до предельного состояния

$$A_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{ср}}}{(2\pi \cdot f_s)^2}; \quad (7)$$

– значения теплового фактора в эрозионно-коррозионном изнашивании

$$T_{\text{ф}} = 2,5 \cdot \frac{q_{\text{ср}}^2}{1,5 + q_{\text{ср}}^4}; \quad (8)$$

– значения кавитационного фактора в эрозионно-коррозионном изнашивании

$$Z = 2\pi \cdot \frac{f_{\text{в}}(P_{\text{охл}} - P_s)}{\rho_{\text{охл}} \cdot C_{\text{охл}}}; \quad (9)$$

– звукового давления, генерируемого втулкой цилиндра при ее колебаниях

$$P_{\text{зв}} = \frac{W_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{охл}} \cdot C_{\text{охл}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{СВ}}}. \quad (10)$$

На завершающем этапе расчета определялись средние скорости эрозионных и коррозионных разрушений $V_{\text{ср}}^{\text{эр}}$, $V_{\text{ср}}^{\text{кор}}$ и средняя скорость эрозионно-коррозионных разрушений $V_{\text{ср}}$

$$V_{\text{ср}}^{\text{эр}} = 2,25 \cdot A_{\text{ср}} \cdot D \cdot \frac{\sigma_{\text{е}}}{R_{\text{ос}}} \cdot T_{\text{ф}} \cdot \frac{P_{\text{зв}}}{P_{\text{охл}} - P_s} \cdot \frac{n_{\text{в}}}{n_{\text{св}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{ос}}$ — акустическое сопротивление материала втулки;

$$V_{\text{ср}}^{\text{кор}} = K_{\text{кор}} \cdot \left(\frac{7}{\text{pH}}\right)^3 \cdot \frac{2,5 \cdot T_{\text{отн}}^2}{1,5 + T_{\text{отн}}^4}; \quad (12)$$

$$V_{\text{ср}} = V_{\text{ср}}^{\text{эр}} + V_{\text{ср}}^{\text{кор}} + 0,05 \cdot V_{\text{ср}}^{\text{эр}} + V_{\text{ср}}^{\text{кор}}. \quad (13)$$

Значение средней скорости эрозионно-коррозионных разрушений позволяет определить время до предельного износа втулки (на 1/3 первоначальной толщины стенки h) $T_{пред}$ и длительность инкубационного периода, предшествующего эрозионно-коррозионным разрушениям $T_{инк}$:

$$T_{пред} = \frac{0{,}333h}{3600V_{ср}}; \quad (14)$$

$$T_{инк} = (0{,}02 + 5 \cdot 10^{-10} \cdot R_{ос}) \cdot T_{пред}. \quad (15)$$

В соответствии с алгоритмом разработана программа в среде Delphi 7, позволяющая исследовать влияние режимных и водно-химических параметров на теплонапряженное состояние и ресурс цилиндровых втулок и оптимизировать данные параметры.

Результаты

Результаты расчета скорости эрозионно-коррозионных разрушений, выполненные для современных средне- и высокооборотных двигателей отечественного производства, а также двигателя Wartsilla 6L20 (6 ЧН 20/28) при условии, что температура охлаждающей жидкости внутреннего контура составляет 80 °С, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели форсированности и расчетные скорости эрозионно-коррозионных разрушений средне- и высокооборотных ДВС

Производитель	Марка дизеля	Цилиндровая мощность, кВт	Среднее эффективное давление, МПа	Удельная масса, кг/кВт	Средняя скорость эрозионно-коррозионных разрушений, мкм/тыс.ч	Время до предельного износа, ч
Барнаултрансмаш	ЧН15/18	18,3 – 22	0,63 – 1,01	6,3 – 7,1	13	6390
Волжский дизель им. Маминых	ЧН21/26	108 – 118	1,2 – 1,6	7,0 – 8,06	14	6150
Пензадизельмаш	ЧН20/28	125 – 187	1,4 – 1,7	6,4 – 7,3	18	4740
РУМО	ЧН22/28	116 – 138	1,58 – 1,77	14 – 18,4	21	4090
	ЧН36/45	110 – 191,6	0,78 – 1,05	25,9 – 31,1	14	5850
Уральский дизель-моторный завод	ЧН21/21	116 – 240	1,44 – 1,65	3,7 – 4,7	43	1950
Звезда	ЧН18/20	83	0,95 – 1,28	2,7 – 3,36	28	2960
Wartsilla	ЧН20/28	130 – 180	2,46	7,6 – 10,3	22	6410

Полученные результаты подтверждают, что эрозионно-коррозионные разрушения цилиндровых втулок наиболее интенсивно протекают в двигателях с высокой степенью форсированности по среднему эффективному давлению и малой удельной массе, приводящей к повышенной виброактивности дизеля.

Для оценки влияния режимов охлаждения на интенсивность эрозионно-коррозионных разрушений и потери теплоты через систему охлаждения были выполнены расчеты для одного из наиболее форсированных отечественных дизелей ЧН21/21 Уральского дизель-моторного завода. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2 и 3.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее оптимальными с энергетической и ресурсной точки зрения для высокооборотных судовых ДВС является температура охлаждающей жидкости 110 … 120 ºС, при давлении, исключающем активное пристеночное кипение (0,13 … 0,14 МПа), и состав охлаждающей жидкости, содержащей комплексную присадку, обеспечивающую водородный показатель в пределах 7,5 … 9,0.

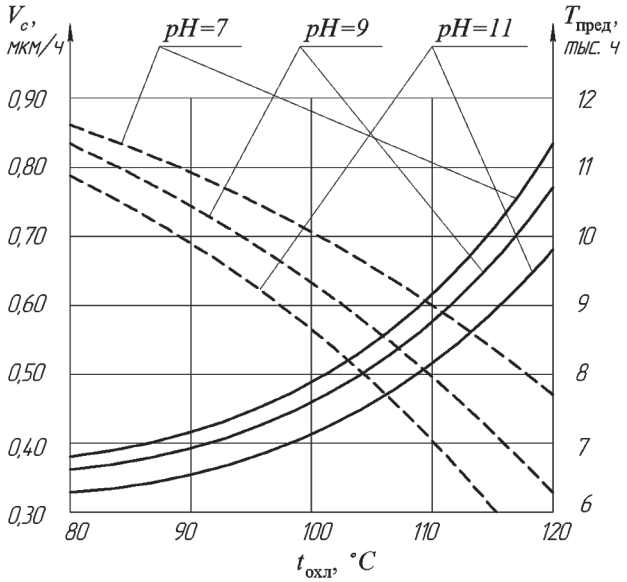


Рис. 2. Влияние режимов охлаждения на интенсивность эрозионно-коррозионного разрушения наружной поверхности гильзы цилиндров

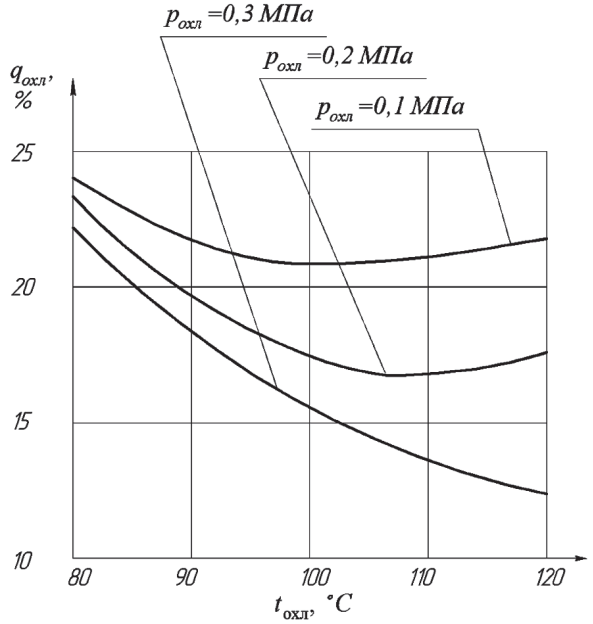


Рис. 3. Влияние режимов охлаждения на тепловые потери с охлаждающей жидкостью

Результаты аналитических исследований были подтверждены в процессе стендовых испытаний двигателя 8ЧН 14/14. При работе двигателя с фиксированной нагрузкой (N_e = 350 кВт) и частой вращения коленчатого вала (n = 2000 мин$^{-1}$) температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя изменялась от 75 до 110 °С. Дальнейшее повышение температуры ограничивалось возможностями герметизации штатной системы охлаждения, давление в которой составляло при температуре 110 °С 0,15 МПа. Повышение температуры жидкости $t_{ОЖ}$ привело к практически линейному возрастанию температуры отработавших газов перед турбиной $t_т$, что вызвало некоторое повышение давления наддува $p_к$ и температуры воздуха после компрессора $t_к$ (табл. 2). Более существенным было повышение температуры на впуске $t_{вп}$, что объясняется уменьшением глубины охлаждения наддувочного воздуха в охладителе, включенном во внутренний контур охлаждения.

Таблица 2

Результаты стендовых испытаний двигателя 8ЧН 14/14

$t_{ож}$	75	80	85	90	95	100	105	110
g_e	0,210	0,208	0,206	0,205	0,204	0,203	0,203	0,204
$t_{вп}$	91	93	98	102	104,8	112	122	133
$t_т$	582	590	595	602	608	610	612	614
$t_к$	159	160	161	162	163	164	165	166

Минимальное значение удельного эффективного расхода топлива соответствовало $t_{ОЖ}$ = 106 °С. При дальнейшем увеличении температуры удельный эффективный расход топлива начал возрастать, что объясняется снижением коэффициента наполнения и подтверждает необходимость увеличения глубины охлаждения наддувочного воздуха при использовании ВТО. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

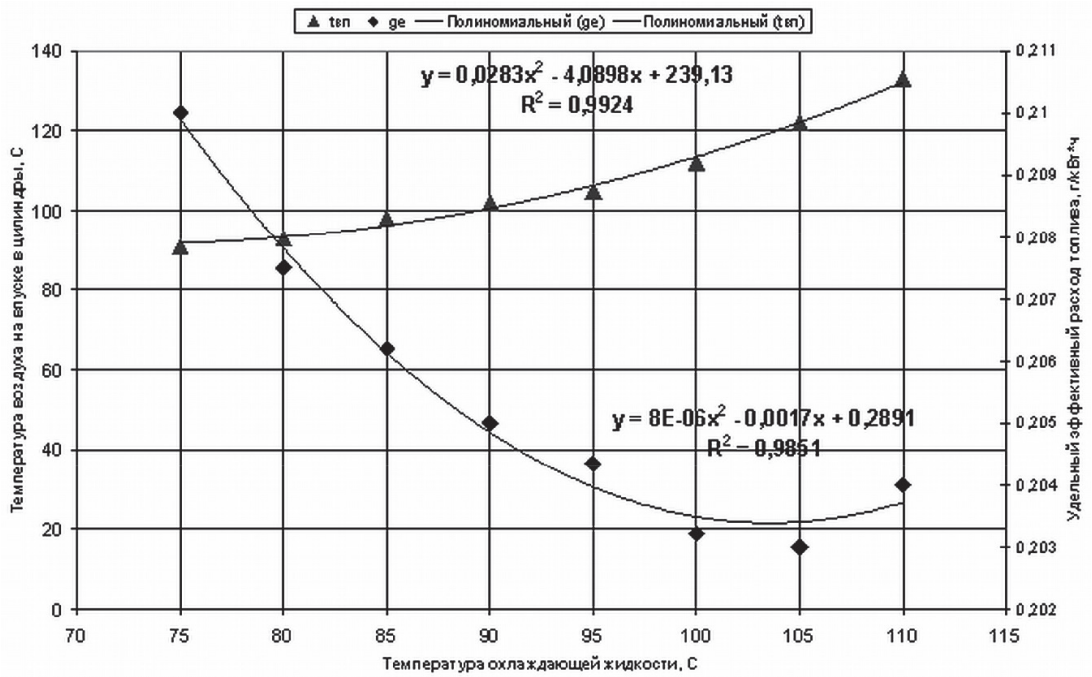


Рис. 4. Влияние температуры охлаждающей жидкости
на удельный эффективный расход топлива двигателя 8 ЧН 14/14

Обсуждение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Результаты выполненных расчетов подтвердили, что наиболее интенсивно эрозионно-коррозионные разрушения протекают в двигателях с повышенной виброактивностью, обусловленной высоким средним эффективным давлением и низкой удельной массой двигателя.

2. Доказано влияние параметров охлаждения (температуры охлаждающей жидкости, давления в системе охлаждения, водородного показателя охлаждающей жидкости) на экономические и ресурсные показатели работы ДВС.

3. Проведено математическое моделирование, позволившее определить оптимальные значения указанных параметров, для средне- и высокооборотных высокофорсированных судовых дизелей.

4. Корректность полученных в результате расчетов выводов подтверждена экспериментально при проведении моторных испытаний.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают перспективность перевода судовых дизелей на высокотемпературное охлаждение [15], [16] и внедрение систем автоматического регулирования параметров охлаждения. Обеспечение оптимальных режимных параметров охлаждения может быть осуществлено при помощи устройств, предложенных в работе [17], автоматическое регулирование состава охлаждающей жидкости с целью обеспечения требуемых водно-химических режимов реализуется в системах охлаждения, предложенных в работе [18]. Для внедрения систем высокотемпературного охлаждения необходимо провести исследования, направленные на обеспечение герметичности полостей охлаждения при условии повышения давления во внутреннем контуре системы охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ципленкин Г. Е.* Уровень форсировки поршневых ДВС нового поколения / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2016. — № 1. — С. 25–30.

2. *Безюков О. К.* Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.

3. *Дорохов А. Ф.* Моделирование теплопередачи через стенку рабочего цилиндра поршневого ДВС и управление его напряженно-деформированным состоянием. / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 1 (45). — С. 68–74.

4. *Гулиев Н. Р.* Анализ условий работы деталей цилиндропоршневой группы современных двигателей внутреннего сгорания / Н. Р. Гулиев, В. А. Рыжов, Е. В. Коробов, Д. А. Никитин // Аграрные конференции. — 2017. — № 5 (5). — С. 19–29.

5. *Безюков О. К.* Охлаждающие жидкости транспортных ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2009. — 263 с.

6. *Полипанов И. С.* Повышение надежности систем охлаждения / И. С. Полипанов, О. К. Безюков, Е. К. Забелина // Речной транспорт (XXI век). — 1988. — № 3. — С. 30–32.

7. *Безюков О. К.* Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 272 с.

8. *Большаков В.Ф.* Эксплуатация судовых среднеоборотных дизелей / В. Ф. Большаков, Ю. Я. Фомин, В. И. Павленко. — М.: Транспорт, 1983. — 160 с.

9. *Кригер А. М.* Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей / А. М. Кригер, М. Е. Дискин, А. Л. Новенников, В. И. Пикус. — М.: Машиностроение, 1985. — 176 с.

10. *Камкин С. В.* Эксплуатация судовых дизелей / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1990. — 344 с.

11. *Громогласов А. А.* Водоподготовка, процессы и аппараты / А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильщиков. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 270 с.

12. *Тузов Л. В.* Защита элементов жидкостных систем охлаждения ДВС от кавитационно-коррозионных разрушений / Л. В. Тузов, О. К. Безюков, В. А. Жуков // Двигатель-97. Материалы междунар. науч.-техн. конф. — М.: МГТУ, 1997. — С. 67–68.

13. *Тузов Л. В.* Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания / Л. В. Тузов, О. К. Безюков, О. В. Афанасьева. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 348 с.

14. *Лебедев О. Н.* Двигатели внутреннего сгорания речных судов / О. Н. Лебедев, В. А. Сомов, С. А. Калашников. — М.: Транспорт, 1990. — 328 с.

15. *Churchill R. A.* Low-heat rejection engines – a concept review / R. A. Churchill, J. E. Smith, N. N. Clarc, R. A. Turton. — SAE Technical Paper Series, 1989. — № 890153. — Pp. 25–36.

16. *Koch F. W.* Cooling System Development and Optimization for DI Engines / F. W. Koch, F. G. Haubner. — SAE Technical Paper Series, 2000. — № 2000-01-0283. — 16 p. DOI: 10.4271/2000-01-0283.

17. Пат. 2459093 Российская Федерация, МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков; заяв. и патентообл. О. К. Безюков, В.А. Жуков. — № 2011113342/06; Заявлено 06.04.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. — 7 с.

18. Пат. 2453714 Российская Федерация, МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / В. А. Жуков; заяв. и патентообл. В. А. Жуков. — № 2011113338/06; Заявлено 06.04.2011; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. — 7 с.

REFERENCES

1. Tsyplenkin, G.E., and V.I. Iovlev. "New Generation Reciprocating Engines: Boost Level." *Dvigatelestroenie* 1 (2016): 25–30.

2. Bezjukov, Oleg Konstantinovich, and Vladimir Anatoljevich Zhukov. "State and prospects of ship engine-building in Russia." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.

3. Dorokhov, A.F., and N.V. Pakhomov. "Heat transfer through the walls of the piston ice working cylinder simulation and management of its stress-strain condition." *Modern technologies. System analysis. Modeling* 1(45) (2015): 68–74.

4. Guliev, N.R., V.A. Ryzhov, E.V. Korobov, and D.A. Nikitin. "Analiz uslovii raboty detalei tsilindroporshnevoi gruppy sovremennykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya." *Agrarnye konferentsii* 5(5) (2017): 19–29.

5. Bezyukov, O.K., and V.A. Zhukov. *Okhlazhdayushchie zhidkosti transportnykh DVS*. SPb.: SPGUVK, 2009.

6. Polipanov, I.S., O.K. Bezyukov, and E.K. Zabelina. "Povyshenie nadezhnosti sistem okhlazhdeniya." *Rechnoi transport (XXI vek)* 3 (1988): 30–32.

7. Bezyukov, O.K., V.A. Zhukov, and V.N. Timofeev. *Okhlazhdenie transportnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.

8. Bol'shakov, V.F., Yu.Ya. Fomin, and V.I. Pavlenko. *Ekspluatatsiya sudovykh sredneoborotnykh dizelei*. M.: Transport, 1983.

9. Kriger, A.M., M.E. Diskin, A.L. Novennikov, and V.I. Pikus. *Zhidkostnoe okhlazhdenie avtomobil'nykh dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1985.

10. Kamkin, S. V., I.V. Voznitskii, and V.P. Shmelev. *Ekspluatatsiya sudovykh dizelei*. M.: Transport, 1990.

11. Gromoglasov, A.A., A.S. Kopylov, and A. P. Pil'shchikov. *Vodopodgotovka, protsessy i apparaty*. M.: Energoatomizdat, 1990.

12. Tuzov, L.V., O.K. Bezyukov, and V.A. Zhukov. "Zashchita elementov zhidkostnykh sistem okhlazhdeniya DVS ot kavitatsionno-korrozionnykh razrushenii." D*vigatel'-97. Materialy mezhdunarodnoi nauchno–tekhnicheskoi konferentsii*. MGTU, Moskva, 1997. 67–68.

13. Tuzov, L.V., O.K. Bezyukov, and O.V. Afanas'eva. *Vibratsiya sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012.

14. Lebedev, O.N., V.A. Somov, and S.A. Kalashnikov. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya rechnykh sudov*. M.: Transport, 1990.

15. Churchill, R.A., J. E. Smith, N. N. Clarc, and R. A. Turton. *Low-heat rejection engines – a concept review*. SAE Technical Paper Series, 1989. № 890153.

16. Koch, Franz W., and Frank G. Haubner. *Cooling system development and optimization for DI engines*. No. 2000-01-0283. SAE Technical Paper, 2000.

17. Bezyukov, O.K., and V.A. Zhukov. RU 2 459 093 C1, IPC F 01 P 5/10. Sistema okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Aug. 2012.

18. Zhukov, V.A. RU 2 453 714 C1, IPC F 01 P 5/10. Sistema okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Russian Federation, assignee. Publ. 20 June 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *okb-nayka@yandex.ru*, *kaf_sdvs@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezjukov, Oleg K. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *okb-nayka@yandex.ru*, *kaf_sdvs@gumrf.ru*

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *va_zhukov@rambler.ru*,
zhukovva@gumrf.ru
Пуляев Андрей Араратович — аспирант
Научный руководитель:
Жуков Владимир Анатольевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_sdvs@gumrf.ru*

Zhukov, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *va_zhukov@rambler.ru*,
zhukovva@gumrf.ru
Pulyaev, Andrej A. — Postgraduate
Supervisor:
Zhukov, Vladimir A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_sdvs@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF MARINE TRANSITION PARAMETERS ON THE OPERATIONAL COEFFICIENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THE SHIP

V. Ye. Leonov[1], V. V. Timoshenko[1, 2]

[1] — Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine
[2] — Shipping Company "NIESKO", Nikolaev, Ukraine

Outlines the aspects of determining the economic efficiency and environmental safety of a real voyage of the vessel "SORMOVSKIY-45" on the route Rostov-on-Don (Russia) — Durres (Albania), carried out in February 2017. The regulatory basis of this article is the Resolutions of the International Maritime Organization and (IMO) its committees in terms of saving the consumption of marine fuel and, accordingly, reducing the emission of components of "greenhouse" gases - carbon dioxide, soot, hydrocarbons, nitrogen oxides. This is the implementation of such IMO documents as the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), the Constructed Energy Efficiency Rate of the Vessel (EEDI), the Operational Efficiency of the Vessel (EEOI). Unlike the previous normative documents, which have the main goal of reducing the transition time, the above-mentioned IMO documents have the following main objective: to reduce the consumption of marine fuel and to reduce the emissions of the components of "greenhouse" gases from the waste gases of ship power plants. In the process of a real sea crossing, the influence of the ship's speed, the mass of the cargo being transported, the distance of the sea crossing, the capacity of the ship's power plant (SPP), the number of turns on the crankshaft of the SPP at the EEOI. On the basis of the computational studies performed, work was carried out to minimize the EEOI. The minimum values of EEOI in real flight conditions can be achieved under the following conditions-the mass of the cargo to be transported must be within the range of at least 3000 – 3100 Mt, ship speed within 6.5 – 9.0 Kn. The transition distance does not affect the magnitude of the EEOI. The above results may be affected by hydrometeorological conditions.

Keywords: consumption, ship fuel, minimization, Constructive, Operational, «greenhouse» effect, Management Plan, Energy efficiency.

For citation:
Leonov, Valery Ye., and Vladislav V. Timoshenko. "Investigation of the impact of marine transition parameters on the operational coefficient of energy efficiency of the ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

УДК 574+504.054:656.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ПЕРЕХОДА НА ОПЕРАЦИОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

В. Е. Леонов[1], В. В. Тимошенко[1, 2]

[1] — Херсонская Государственная морская академия, Херсон, Украина
[2] — Судоходная компания «NIESCO», Николаев, Украина

Изложены аспекты определения экономической эффективности и экологической безопасности реального рейса судна «SORMOVSKIY-45» на маршруте Ростов-на-Дону (РФ) — Дуррес (Албания), выполненного в феврале 2017 г. За нормативную базу данной статьи приняты Резолюции Международной морской организации (ММО) и ее комитетов в части экономии расхода судового топлива и, соответственно, снижения эмиссии компонентов «парниковых» газов: диоксида углерода, сажи, углеводородов, оксидов азота. Речь идет об имплементации таких документов ММО, как План управления энергетической эффективности судна (ПУЭЭС), Конструктивный (достигнутый) коэффициент энергетической эффективности судна (К(Д)КЭЭС), Операционный коэффициент энергетической эффективности судна (ОКЭЭС). В отличие от предыдущих нормативных документов, ставящих основной целью сокращение времени перехода, вышеприведенные документы ММО имеют следующую основную цель: сокращение расхода судового

топлива и снижение эмиссии с отработанными газами судовых энергетических установок компонентов «парниковых» газов. В процессе реального морского перехода исследовано влияние скорости судна, массы перевозимого груза, дистанции морского перехода, используемой мощности судовой энергетической установки (СЭУ), количества оборотов на коленчатом валу СЭУ на ОКЭЭС. На основании выполненных расчетных исследований проведены работы по минимизации ОКЭЭС. Минимальные значения ОКЭЭС в условиях реального рейса могут быть достигнуты при следующих условиях: масса перевозимого груза должна быть в пределах не менее 3000 – 3100 т, скорость судна в пределах 6,5 – 9,0 уз. Дистанция перехода не влияет на величину ОКЭЭС. На приведенные выше результаты могут оказать влияние гидрометеорологические условия.

Ключевые слова: расход, судовое топливо, минимизация, конструктивный и операционный коэффициент, «парниковый» эффект, план управления, энергетическая эффективность.

Для цитирования:
Леонов В. Е. Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности судна / В. Е. Леонов, В. В. Тимошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

Введение (Introduction)

1 января 2013 г., в соответствии с Резолюцией Комитета по защите морской среды IMO MEPC.213(63), вступило в силу дополнение к МАРПОЛ 73/78 [1]. 22-е Правило этой главы предписывает в обязательном порядке иметь на борту каждого судна валовой вместимостью более 400 План управления энергоэффективностью судна (Ship Energy Efficiency Management Plan — SEEMP, или ПУЭЭС) [1] – [3].

Цель ПУЭЭС — разработать рекомендации для повышения энергетической эффективности морских грузоперевозок при безусловном выполнении требований по защите экипажа судна и окружающей среды.

Эффективность ПУЭЭС зависит от использования судном накопленного научного и практического опыта в части экономии топлива, снижения времени погрузочно-разгрузочных работ, уменьшения эмиссии вредных токсичных компонентов с отработанными газами судовых энергетических установок (ОГ СЭУ).

Требования к SEEMP регламентированы Правилом 22 Приложения VI МАРПОЛ; Резолюцией MEPC.203(62); Резолюцией MEPC.212(63); Резолюцией MEPC.213(63); Резолюцией MEPC.214(63); Резолюцией MEPC.215(63); Резолюцией MEPC.278(70), действие которых началось с 01 марта 2018 г.

Комитет по защите морской среды Международной морской организации (ММО) Резолюцией MEPC.282(70) от 28.10.2016 принял Руководство по разработке Плана управления энергетической эффективности судна. Основным отличием нового документа является учет требований Резолюции MEPC.278(70) от 28.10.2016 по обеспечению ежегодной отчётности судов валовой вместимостью 5000 и более о расходе топлива, пройденном расстоянии и времени в пути. В Резолюции MEPC.282(70) отмечено, что заблаговременное изменение данного руководства связано с необходимостью обеспечения «единообразного и эффективного осуществления правил, а также предоставления отрасли достаточного времени для подготовки».

ПУЭЭС имеет две части: ч. 1. «План управления, направленный на повышение энергоэффективности»; ч. 2. «План сбора данных по расходу топлива».

Для сбора данных о годовом расходе судового топлива рекомендованы следующие методы:

1. Метод на основе накладных на поставку бункерного топлива.

2. Метод на основе использования расходомеров.

3. Метод на основе мониторинга количества бункерного судового топлива в танках, имеющихся на борту.

Пройденное расстояние должно регистрироваться в журнале в соответствии с Правилом V/28.1 Конвенции СОЛАС-74 [4]. При этом учитывается только расстояние, пройденное при дви-

жении судном самостоятельно. Время в пути должно представлять собой суммарную продолжительность движения судна своим ходом. План сбора данных должен содержать меры контроля качества данных, которые должны быть интегрированы в действующую на судне систему управления безопасностью [5]. В План включают процедуры идентификации пробелов в данных и их устранения в случае отсутствия данных мониторинга, вследствие неисправности расходомера. Собранные данные должны предоставляться в стандартизированном формате:

– в соответствии с системой опознавательных номеров судов ММО, принятой Резолюцией А.1078(28);

– в соответствии с правилом 2 Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78;

− валовая вместимость должна рассчитываться в соответствии с Международной конвенцией по обмеру судов 1969 года;

– NT должна рассчитываться в соответствии с Международной конвенцией по обмеру судов 1969 года;

– DWT означает разницу в тоннах между водоизмещением судна в воде с относительной плотностью 1025 кг/м^3 при осадке по летнюю грузовую марку и при весе судна порожнем;

– ККЭЭ должен рассчитываться в соответствии с Руководством 2014 г. по методу вычисления фактического ККЭЭ для новых судов с поправками, принятыми Резолюцией МЕРС.245(66);

– ледовый класс должен быть обозначен в соответствии с определением, приведенным в Международном кодексе для судов, эксплуатирующихся в полярных водах, принятом Резолюциями МЕРС.264(68) и MSC.385(94);

– приводится мощность двигателей, если она превышает 130 кВт, номинальная мощность означает максимальную длительную мощность, указанную в паспортной характеристике двигателя;

– один из трёх вышеуказанных методов.

В Руководстве 2016 г. указано, что ч. I ПУЭЭС может быть элементом судовой системы управления безопасностью, но если в судоходной компании действует система экологического менеджмента, соответствующая Стандарту ISO 14001, то мониторинг эксплуатационной экологической эффективности может быть неотъемлемой частью системы экологического менеджмента.

Проектный индекс энергетической эффективности для новых судов EEDI (или конструктивный коэффициент энергетической эффективности) и эксплуатационный (операционный) критерий энергетической эффективности судна EEOI имеют одинаковый физический смысл: отношение количества произведенного «парникового» газа CO_2 к величине транспортной работы судна за определенный период времени [6], [7].

Стадии разработки ПУЭЭС [8]: планирование; реализация, внедрение; мониторинг; самооценка и усовершенствование. Судовой ПУЭЭС разрабатывается компанией для каждого судна с использованием эксплуатационного (операционного) коэффициента энергетической эффективности (EEOI) в соответствии с рекомендациями МЕРС.1/Circ.684 от 17.08.2009 г. и Резолюцией МЕРС 203, принятой 15.07.2011 г. Основные рекомендации, которые могут быть включены в ПУЭЭС, приведены далее [8]:

1. *Топливосберегающая эксплуатация судов и улучшенное планирование рейса* могут быть достигнуты разработкой оптимального маршрута с использованием программного обеспечения для решения различных задач, в том числе навигационных, на морском переходе, проводки судна наивыгоднейшими путями с учётом конкретных гидрометеорологических условий.

2. *Соблюдение сроков рейса* для планирования совместной работы портов и судна, своевременной постановки судна к причалу и взятия его под обработку.

3. *Оптимизация скорости* не означает минимальную скорость. Фактически при плавании со скоростью ниже оптимальной расход топлива выше, при малых скоростях проявляется повышенная вибрация и проблемы, связанные с налетом сажи в камерах сгорания и в выхлопных системах. При согласовании условий чартера следует направлять усилия на поощрение судна к эксплуатации с оптимальной скоростью для максимального повышения энергоэффективности.

4. *Оптимизированная мощность на валу* — рекомендуемая эксплуатация судна при постоянной частоте вращения вала.

5. *Оптимизация процесса управления судном* — дифферент судна в грузу или в балласте оказывает большое влияние на сопротивление судна в воде, а оптимизация дифферента может обеспечить значительную экономию топлива. Полному применению оптимизации дифферента могут препятствовать конструкция судна или факторы безопасности.

6. *Оптимальный балласт.* Балласт следует корректировать с учетом требований относительно оптимальных условий дифферента и управления судном, а также условий оптимального балласта, обеспечиваемого посредством надлежащего планирования погрузки. Условия и меры по управлению балластом изложены в Судовом плане управления балластными водами.

7. *Оптимизация набегающего на гребной винт потока*. Улучшение набегающего на гребной винт потока воды с помощью таких устройств, как бортовые управляемые рули или направляющие насадки, может повысить эффективную пропульсивную мощность и поэтому позволяет сократить расход топлива. Энергоэффективность можно значительно повысить путем очистки и полировки гребного винта или изменением его покрытия.

8. *Оптимальное использование рулевого устройства и системы управления курсом судна* (авторулевой) — достигается улучшением управления курсом путем менее частых и незначительных перекладок пера руля и сводит к минимуму потери энергии вследствие сопротивления руля. При подходе к портам и лоцманским станциям авторулевой не всегда более эффективен, поскольку ручное управление рулем обеспечивает более быстрое реагирование на подаваемые команды.

9. *Уход за корпусом судна, удаление биообрастаний и шероховатости.* Сопротивление корпуса может быть снижено за счёт покрытия по новой технологии, возможно, в сочетании с меньшими промежутками между очистками. Должна присутствовать регулярная проверка состояния корпуса судна на плаву. Чем более гладкой является поверхность корпуса, тем выше эффективность использования топлива.

10. Альтернативные виды топлив для СЭУ [9]:

– сжиженный природный газ (LNG);

– метанол, высшие алифатические спирты;

– водород (сырье для получения водорода неисчерпаемо — вода, продуктом сгорания водорода является вода);

– сероводород, содержащийся в растворенном состоянии в морской воде, представляет потенциальную угрозу, а с другой стороны, является энергоносителем с большой кратностью запаса;

– водно-топливные, спиртово-топливные эмульсии, предназначенные для экономии углеводородного топлива, снижения эмиссии вредных токсичных компонентов с отработанными газами СЭУ;

– присадки к топливам и смазочным материалам позволяют решить следующие проблемы: снизить концентрацию сажи в отработанных газах СЭУ, улучшить триботехнические характеристики смазочных материалов, снизить коэффициент трения, увеличить время межремонтного пробега машин и механизмов судового оборудования.

11. *Утилизация теплоты ОГ СЭУ.* Существующие на судах технологии утилизации теплоты ОГ СЭУ имеют ряд недостатков: 1) низкий коэффициент использования теплоты ОГ СЭУ; 2) большая трудоемкость и опасность для экипажа, обусловленная частыми и вредными для экипажа работами по очистке от сажи трубных сборок котла-утилизатора; 3) выброс сажи с продувочными газами в атмосферу. Авторами статьи разработано новое техническое решение по утилизации теплоты ОГ СЭУ, которое позволяет исключить указанные выше недостатки [9].

12. *Рациональное использование тоннажа* может быть обеспечено путем усовершенствования планирования работы флота и в особенности сокращения периодов балластного перехода, в чем заинтересованы все стороны перевозки груза.

13. Контролировать и рассчитывать целесообразность содержания изношенных судов с целью выявления выгоды и потерь от необходимых ремонтов изношенных судов и поддержания их в хорошем техническом и мореходном состояниях.

14. *Район плавания и перевозок.* В районах, соответствующих его классу согласно Классификационному свидетельству. Пути выбора наиболее эффективного сочетания района плавания и перевозимого груза лежат в сфере компетенции и ответственности судоходной Компании.

15. *Совместимость мер.* В процессе морской перевозки участвуют различные заинтересованные стороны и в этой связи важно иметь налаженные и усовершенствованные пути взаимодействия для осуществления успешной перевозки грузов.

Необходимо отметить, что предложенные рекомендации имеют общий характер, поэтому для каждого конкретного проекта судна при разработке ПУЭЭС необходимо учитывать его специфику, характеристику перевозимых грузов, навигационное планирование перехода, время года, даты выхода / прихода в порт.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы минимизации операционного коэффициента энергетической эффективности судна (ОКЭЭС) за счет оптимизации скорости судна (пп. 3), массы перевозимого груза и дистанции перехода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве объекта исследований выбраны реальное судно и реальный рейс (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика судна

Название	SORMOVSKIY-45
Флаг	Молдова
Судовладелец	NAVIMAR LTD
Номер ММО	8133566
Валовая вместимость	2478
Позывной сигнал	ERWP
Тип судна	Генеральный груз
Экипаж	14 человек
Год и место постройки	1982, Россия
Классификационное общество	PMPC
Район плавания	SORMOVSKIY-45
Мощность судовой энергетической установки, КВт	1350
Используемое судовое топливо на маршруте перехода	Дизельное ЕВРО зимнее, сорт С, экологического класса К5 (ДТ-З-К5)

Скорость судна и дистанция морского перехода определяются с помощью допплер-лага FURUNO DS-80. Объем загруженного при бункеровке судового топлива определяется с помощью расходомеров, а расходуемое топливо на конкретный переход — по изменению уровня топлива в танке.

Выполним анализ гидрометеорологических условий в Азово-Черноморском и Средиземноморском бассейнах между портами Ростов-на-Дону (РФ) — Дуррес (Албания), с заходом в промежуточные порты на январь – февраль 2017 г. При выходе судна из р. Дон атмосферное давление 1032 кПа, незначительное ветровое волнение, высота волны 0,5 м, ветер до 5 м / с в полосе экваториальной депрессии, в которой создаются условия для образования циклонов. Антициклон 1030 кПа, в центре Черного моря и антициклон 1034 кПа в центре Азовского моря способствуют хорошей погоде, атмосферное давление 1033 кПа. Видимость хорошая — 5 миль.

Над материковой Грецией появился антициклон 1020 кПа, который подвинул антициклон 1018 кПа к югу Эгейского моря и в результате объединился с циклоном 1010 кПа, который находится на острове Сицилия. Атмосферное давление на переходе 1012 кПа, ветер юго-восточный 7 – 10 м/с. Высота волны 2,5 м. Перед приходом в порт атмосферное давление имеет

значение 1014 кПа. Скорость ветра достигает 5 м/с. Ветровое волнение сохраняется. Высота волны 2 м.

Несмотря на то, что Правило 21 Прил. VI МАРПОЛ 73/78 не требует расчета конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна (ККЭЭС) для судов типа т/х «Сормовский-45», авторами статьи в порядке исключения был выполнен расчет ККЭЭС для сравнения с ОКЭЭС.

Расчеты ОКЭЭС выполнены согласно разработанной компьютерной программе для условий рейса в Азово-Черноморском и Средиземноморском бассейнах между портами Ростов-на-Дону – Дуррес, с заходом в промежуточные порты. Прием на борт судна груза выполняется согласно удельному погрузочному объему (УПО) груза, рассчитанному для полной вместимости в грузовые отсеки судна.

Результаты (Results)

ККЭЭС рассчитан по формулам [8]:

$$\text{ККЭЭС} = (1 - X / 100) \cdot L; \quad (1)$$

$$L = ab^{-c}, \quad (2)$$

где X — константа, зависящая от типа судна и временного фактора; L — величина базовой линии; a, c — константы: для судна «генеральный груз» a = 107,48; c принимается равным 0,216 [8]; b — дедвейт судна 3346 т; $L = 107{,}48 \cdot 3346^{-0{,}216}/1000 = 0{,}0186$; $\text{ККЭЭС} = (1 - 30/100) \cdot 0{,}0186 = 0{,}01302$.

ОКЭЭС, кг CO_2 / $Nm \cdot mt$, рассчитан по формуле

$$EEOI = \frac{Q_{\text{СТ}} \cdot K_{\text{CO2}}}{D_{Nm} \cdot G_{mt}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{СТ}}$ — расход топлива на переход, т; K_{CO2} = 3,186 — безразмерный коэффициент пересчета расхода топлива в выбросы диоксида углерода в зависимости от содержания углерода в топливе, кг; D_{Nm} — расстояние между портами, мили; G_{mt} — масса груза, погруженного на судно, т.

Расчеты ОКЭЭС должны проводиться для каждого судна с целью анализа для последующей минимизации выбросов диоксида углерода — основного компонента «парниковых газов» [9], [10]. С другой стороны, при снижении расхода судового топлива на выбранный маршрут снижаются выбросы всех токсичных веществ и соединений, содержащихся в ОГ СЭУ.

Расчетные исследования ОКЭЭС проводились в зависимости от изменения следующих параметров:

– скорость судна, уз: 5,1; 6,5; 7,2; 9,0; 10,6; 12,7*; 14,8**.

Примечание. Скорости, отмеченные значками *,**, приняты условно для данного конкретного судна;

– дистанция перехода *Nm*: 409; 380; 265; 740, 1494;

– масса груза *mt*: 1500; 2794; 2900; 3000; 3100;

– обороты коленчатого вала, мин$^{-1}$: 140; 200; 240; 260; 290;

– нагрузка СЭУ, %: 25; 50; 75; 100.

Результаты расчетных исследований представлены в табл. 2 – 6 и на рис. 1 – 4. Влияние дистанции морского перехода на ОКЭЭС показано в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Изменение ОКЭЭС в зависимости от дистанции перехода при G_{mt} = 3100 *mt*, v_c = 10,6 уз

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Дистанция, мили	ОКЭЭС, кг·CO_2 / $Nm \cdot mt$
Ростов – Дуррес	140,9	33,1	1494	0,023
Ростов – Синоп	38,6	9,07	409	0,023
Синоп – Текирдаг	35,8	8,4	380	0,023
Текирдаг – Измир	25	5,88	265	0,023
Измир – Дуррес	69,8	16,4	740	0,023

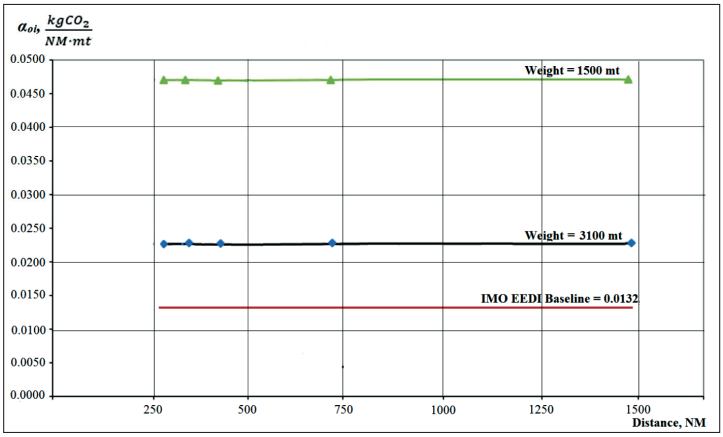


Рис. 1. Зависимость ОКЭЭС от дистанции перехода при скорости судна 10,6 уз

Из представленных данных следует, что дистанция перехода не влияет на ОКЭЭС при фиксированных массах перевозимого груза. Влияние массы перевозимого груза на ОКЭЭС показано в табл. 3 и 4 и на рис. 2 и 3.

Таблица 3

Влияние массы груза на изменение ОКЭЭС при скорости судна v = 10,6 уз

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Расстояние, мили	Масса груза, т	ОКЭЭС, кг·CO_2 / $Nm \cdot mt$,
Ростов – Дуррес	140,9	33,1	1494	3100	0,022
Ростов – Синоп	38,6	9,07	409	3000	0,024
Синоп – Текирдаг	35,8	8,4	380	2900	0,025
Текирдаг – Измир	25	5,88	265	2794	0,047
Измир – Дуррес	69,8	16,4	740	1500	0,023

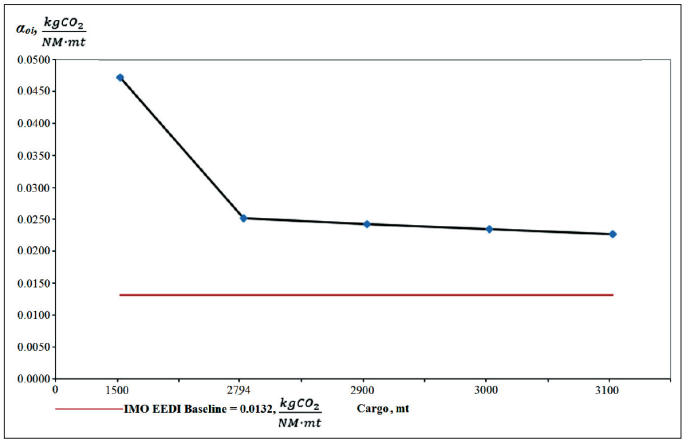


Рис. 2. Зависимость ОКЭЭС от массы груза при скорости 10,6 уз

Таблица 4

Зависимость ОКЭЭС от массы груза и дистанции, при скорости судна v = 9,0 уз

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Расстояние, мили	Масса груза, т	ОКЭЭС, кг·CO_2/м·т
Ростов – Дуррес	166	29,05	1494	3100	0,020
Ростов – Синоп	45,4	7,95	409	3000	0,021
Синоп – Текирдаг	42,2	7,39	380	2900	0,022
Текирдаг – Измир	29,4	5,15	265	2794	0,041
Измир – Дуррес	82,2	14,39	740	1500	0,0207

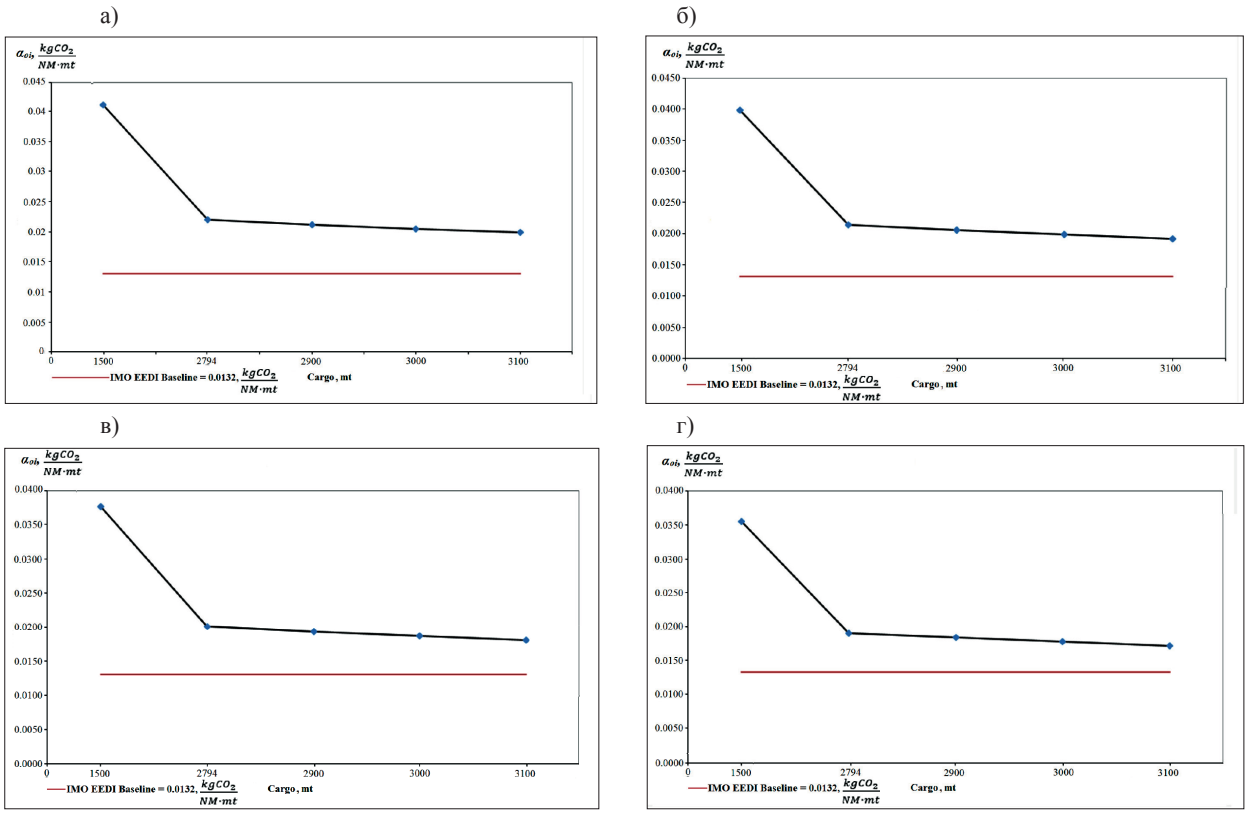


Рис. 3. Зависимости ОКЭЭС от массы груза: *а* — при скорости 9 уз; *б* — при скорости 7,2 уз; *в* — при скорости 6,5 уз; *г* — при скорости 5,1 уз

Установлено, что с увеличением массы груза ОКЭЭС снижается, причем особенно резко при снижении массы груза от 1500 до 2800 т. Снижение скорости судна в диапазоне 10,6 – 5,1 уз приводит к уменьшению ОКЭЭС, что характеризует переход как энергоэффективный. Влияние скорости судна на ОКЭЭС показано на рис. 4.

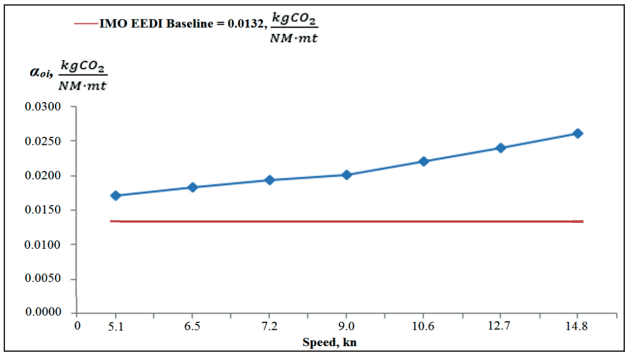


Рис. 4. Зависимость ОКЭЭС от скорости судна при дистанции перехода 1494 миль и массе груза 3100 т

С увеличением скорости судна ОКЭЭС повышается и отклонение от конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна также растет.

Обсуждение (Discussion)

Влияние массы перевозимого груза на ОКЭЭС. ОКЭЭС имеет высокую параметрическую чувствительность в зависимости от массы груза при выбранной скорости судна 10,6 уз:

G_{mt} = 3100 т ОКЭЭС = 0,0228 ΘΘΘΘ
G_{mt} = 3000 т ОКЭЭС = 0,0235 ΘΘΘ
G_{mt} = 2900 т ОКЭЭС = 0,0244 ΘΘ
G_{mt} = 2794 т ОКЭЭС = 0,0253 Θ
G_{mt} = 1500 т ОКЭЭС = 0,0471 ⊕⊕⊕⊕⊕

Значение конструктивного КЭЭС = 0,0132 соответствует линии, параллельной оси абсцисс, на рис. 1 – 4. С уменьшением массы груза величина ОКЭЭС повышается. Аналогичные закономерности наблюдаются и при других исследованных скоростях: 14,8; 12,7; 9,0; 7,2; 6,5; 5,1.

Влияние скорости на ОКЭЭС. Скорость судна изменялась в следующем диапазоне, уз: 5,1; 6,5; 7,2; 9,0; 10,6; 12,7*; 14,8** (скорости, отмеченные значками *,**, приняты условно для данного конкретного судна). Установлено, что с увеличением скорости судна ОКЭЭС повышается (см. рис. 4). Представляет практический интерес анализ изменения соотношения ρ = ОКЭЭС / ККЭЭС в зависимости от скорости судна при массе груза 2794 т и дистанции в грузу 1494 миль. Полученные результаты:

v_1 = 10,6 уз ρ = ОКЭЭС / ККЭЭС = 1,92;
v_2 = 9,0 уз ρ = 1,68;
v_3 = 7,2 уз ρ = 1,62;
v_4 = 6,5 уз ρ = 1,53;
v_5 = 5,1 уз ρ = 1,44.

Из полученных данных следует, что с уменьшением скорости судна соотношение ρ = ОКЭЭС / ККЭЭС снижается от 1,92 до 1,44, что является положительным фактором как для улучшения экономических показателей рейса, так и для защиты окружающей среды.

Влияние количества оборотов на коленчатом валу на ОКЭЭС. Для расчетов приняты: дистанция перехода 409 миль, масса груза 3100 т. Результаты расчетов:

n = 140 мин$^{-1}$ α_{oi} = 0,0171 кг CO_2 / $Nm \cdot mt$;
n = 200 мин$^{-1}$ α_{oi} = 0,0182 кг CO_2 / $Nm \cdot mt$;
n = 240 мин$^{-1}$ α_{oi} = 0,0193 кг CO_2 / $Nm \cdot mt$;
n = 260 мин$^{-1}$ α_{oi} = 0,0200 кг CO_2 / $Nm \cdot mt$;
n = 290 мин$^{-1}$ α_{oi} = 0,0228 кг CO_2 / $Nm \cdot mt$.

Определено, что с увеличением количества оборотов на коленчатом валу ОКЭЭС повышается. Представляет практический интерес определение влияния количества оборотов главного двигателя на эмиссию оксидов азота, которое может быть определено по уравнению [8]:

$$Э_{NOx} = 45n^{-0,2}, \quad (4)$$

где n — количество оборотов, мин$^{-1}$.

Влияние оборотов двигателя и степени использования мощности энергосиловых судовых установок на расход топлива и эмиссию оксидов азота приведено в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Зависимость расхода судового топлива (кг/ч) и эмиссии оксидов азота от оборотов ГД

Наименование	Вид топлива	Частота вращения, мин$^{-1}$						
		140	200	240	260	290	310	330
		Скорость, уз						
		5,7 / 5,0	6,5 / 5,8	8,0 / 7,2	9,0	10,6	12,7	14,8
ГД № 1 Пр. Б. Type 6NVD-48 AU	MDO	35	50	60	80	110,2	141	182,6
ГД № 2 Л. Б. Type 6NVD-48 AU	MDO	35	50	60	80	110,2	141	182,6
Эмиссия оксидов азота, г/кВт·ч	MD	16,75	15,59	15,04	14,79	14,48	14,29	14,11

Таблица 6

Зависимость расхода топлива (кг/ч) дизель-генератора от нагрузки

Механизм	Вид топлива	Нагрузка, кВт			
		25 %	50 %	75 %	100 %
ДГ № 1 50 кВт Type 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6
ДГ № 2 50 кВт Type 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6
ДГ № 3 50 кВт Type 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6

Определено, что с увеличением количества оборотов ГД эмиссия оксидов азота, содержащихся в отработанных газах СЭУ, снижается (см. табл. 5), но запас от нормируемых значений NO_X относительно невелик (находится в пределах 3 – 5 %), что необходимо учитывать в зонах особого контроля NECA.

Следует отметить, что при использовании на судах углеводородного судового топлива необходимо проводить исследования по минимизации расхода судового топлива и, как следствие, — по минимизации выбросов диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов в зависимости от основных параметров эксплуатации судов. В дальнейшем для снижения эмиссии диоксида углерода, вплоть до его исключения, требуется разработка альтернативных источников энергии и переход на альтернативное судовое топливо [9], [10] — табл. 7.

Таблица 7

Коэффициент пересчета (K_{CO2}) расхода судового топлива в выбросы диоксида углерода в зависимости от содержания углерода в топливе

Тип топлива	Источник	Содержание углерода в топливе, массовая доля	K_{CO2}, *t*-CO2/*t*-топлива
1. Diesel/GasOil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	0,8744	3,206
2. Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0,8594	3,151
3. Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0,8493	3,114
4. Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0,8182	3,000
	Butane	0,8264	3,030
5. Liquefied Natural Gas	LNG	0,7500	2,750
6. Ethanol		0,528	1,913
7. Methanol		0,375	1,375
8. Hydrogen		0,0	0,0
9. Hydrogen Sulfide		0,0	0,0

Из анализа табл. 7 следует, что перевод морского транспорта на сжиженный природный газ по сравнению с традиционным углеводородным топливом позволит снизить эмиссию диоксида углерода всего на 10 – 15 %. Перевод судов на спиртовое топливо позволяет снизить эмиссию CO_2 на 40 % (в случае этанола) и на 56 % (в случае метанола). При использовании в качестве судового топлива водорода и сероводорода эмиссия CO_2 полностью отсутствует.

С целью снижения причинения ущерба окружающей среде, биосфере [11] – [13] при эксплуатации судов интересным представляется новое решение для борьбы с вредными выбросами, в частности минимизация ОКЭЭС, при прохождении зоны Панамского канала [14].

Заключение (Conclusion)

В результате выполненных исследований следует отметить, что минимальные значения ОКЭЭС в условиях реального рейса могут быть достигнуты при следующих условиях: масса перевозимого груза должна быть в пределах не менее 3000 – 3100 т, скорость судна — в пределах 6,5 – 9,0 уз. Дистанция перехода не влияет на величину ОКЭЭС. На приведенные выше результаты могут оказать влияние гидрометеорологические условия. Для обобщения полученных результатов с целью переноса их на другие суда необходимо расширить специфику и структуру исследований.

Авторы выражают благодарность капитанам дальнего плавания В. Н. Жмур, Л. А. Пивоварову, А. А. Гурову, канд. техн. наук О. Н. Товстокорому, ведущему научному сотруднику И. И. Рублёву, принявшим участие в обсуждении отдельных разделов работы и высказавшим критические замечания в адрес отдельных положений настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols. — London: CPI Group (UK) Ltd, 2011. — 448 p.

2. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators. — London: Lloyd's Register, 2012. — 12 p.

3. *Пивоваров Л. А.* Разработка плана управления энерго-эффективностью судна (ПУЭЭС) для танкеров / Л. А. Пивоваров // Збірка матер. Міжн. Наук. Практик. Конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» – MINTT-2013. — Херсон: ВЦ ХДМА, 2013. — Т. 1. — С. 73–77.

4. SOLAS. Consolidated text jf the International Convention for the Safety of Life ft Sea .1974£ its. Protocol of 1988: articles, annexes and certificates. — London: IMO, 2004. — 566 p.

5. *Богданов В. И.* Синергетический подход к задаче оптимизации качества управления судном на курсе /В. И. Богданов, С. А. Подпорин, А. С. Потапов // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. — 2006. — Вып. 57. — С. 29–34.

6. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. — London: World Maritime University, 2013. — 61 p.

7. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI). — London: IMO, 2009. — 75 p.

8. *Леонов В. Е.* Современные информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование: монография / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев, О. Н. Безбах, А. А. Гуров, В. Б. Сыс, В. Ф. Ходаковский. — Херсон: ВЦ ХДМА, 2014. — 324 с.

9. *Леонов В. Е.* Защита окружающей среды. при эксплуатации судов: монография. / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2017. — 252 с.

10. *Дмитриев В. И.* Информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование (e-NAVIGATION): учеб. пособие / В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2013. — 176 с.

11. *Пипченко А. Д.* Теоретические аспекты судовождения: учеб. пособие / А. Д. Пипченко. — Одесса: ОНМА, 2013. — 144 с.

12. *Лобастов В. М.* Электронные картографические системы в судовождении: учеб. пособие / В. М. Лобастов. — Владивосток: Мор. госуд. ун-т, 2009. — 166 с.

13. *Бездух М. О.* Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної небезпеки: навчальний посібник / М. О. Бездух. — К.: Основа, 2003. — 191 с.

14. Панамский канал: новое решение для борьбы с вредными выбросами. Работник моря // Всеукраинская морская газета. — 31 октября 2017. — № 20 (132). — С. 2.

REFERENCES

1. *MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and1997 Protocols.* London: CPI Group (UK) Ltd, 2011.

2. *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators*. London: Lloyd's Register, 2012.

3. Pivovarov, L.A. "Razrabotka plana upravleniya energo-effektivnost'yu sudna (PUEES) dlya tankerov." *Zbirka mater. Mizhn. Nauk. - Praktik. Konf. «Suchasni informa-tsiini ta innovatsiini tekhnologiï na transporti»-MINTT-2013*. Vol. 1. Kherson: VTs KhDMA, 2013: 73–77.

4. *SOLAS. Consolidated text jf the International Convention for the Safety of Life ft Sea .1974£ its. Protocol of 1988: articles, annexes and certificates*. London: IMO, 2004.

5. Bogdanov, V.I., S.A. Podporin, and A.S. Potapov. "Sinergeticheskii podkhod k zadache optimizatsii kachestva upravleniya sudnom na kurse." P*roblemy i metody razrabotki i ekspluatatsii vooruzheniya i voennoi tekhniki VMF* 57 (2006): 29–34.

6. *MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships*. London: World Maritime University, 2013.

7. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI)*. London: IMO, 2009.

8. Leonov, V.E., V.I. Dmitriev, O.N. Bezbakh, A.A. Gurov, V.B. Sys, and V.F. Khodakovskii. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti su-dokhodstva i ikh kompleksnoe ispol'zovanie. Monografiya*. Kherson: VTs KhDMA, 2014.

9. Leonov, V.E., and V.I. Dmitriev. *Zashchita okruzhayushchei sredy. pri ekspluatatsii sudov: Monografiya*. M.: MORKNIGA, 2017.

10. Dmitriev, V.I. *Informatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti sudokhodstva i ikh kompleksnoe ispol'zovanie (e-NAVIGATION): Uchebnoe posobie*. M.: «MORKNIGA», 2013.

11. Pipchenko, A.D. *Teoreticheskie aspekty sudovozhdeniya: Uchebnoe posobie*. Odessa: ONMA, 2013.

12. Lobastov, V.M. *Elektronnye kartograficheskie sistemy v sudovozhdenii: Uchebnoe posobie*. Vladivostok: Mor. Gosud. Un-t, 2009.

13. Bezdukh, M.O. *Metodika viznachennya rizikiv ta ïkh priinyatnikh rivniv dlya deklaruvannya ob'ektiv pidvishchenoï nebezpeki: navchal'nii posibnik*. K.: Osnova, 2003.

14. "Panamskii kanal: novoe reshenie dlya bor'by s vrednymi vybrosami. Rabotnik moray." *Vseukrainskaya morskaya gazeta* 20(132) (2017): 2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская Государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: *Leonov_V_E@i.ua*

Тимошенко Владислав Викторович —
старший помощник капитана, ассистент
Судоходная компания «NIESCO»
54017, Украина, Николаев, ул. Буденного, 44
Херсонская Государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: *vladlian1977@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov, Valery Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Av., Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: *Leonov_V_E@i.ua*

Timoshenko, Vladislav V. —
Senior assistant to the captain, assistant
Shipping Company "NIESKO"
44 Budennogo Str., Nikolaev, 54017, Ukraine
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Av., Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: *vladlian1977@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.
Received: January 26, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-402-410

RESEARCH OF BENDING ENDURANCE OF GEAR WHEELS IN MARINE GEARBOXES SUBJECTED TO SURFACE HARDENING BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS

A. Salameh

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The investigation of influence of the roughness and microroughness in transitional surfaces of gear wheels zone on their flexural endurance is given in the paper. The technology of manufacturing gear wheels and the quantity of manual polishing of tooth cavities in the total complexity of their fabrication, as well as the applied steel grades for wheels hardened by surface quenching with high frequency currents is considered. The requirements to the quality of the tooth surface after machining are presented. The designs of circular samples, experimental gears and test conditions are determined. The modes of hardening by high-frequency currents of samples and wheels are presented. The ranges of roughness and values for the stresses under which the studies are carried out are justified. The results of the tests were processed by carrying out a regression analysis. The results were presented analytically in the form of an equation of the empirical regression line and graphically in a coordinate system with the σ and lgN axes. Based on the results of the fatigue tests of specimens and teeth in the area of limited endurance, it is evident that the slope of the branches of the fatigue curves for teeth and specimens differ depending on the surface roughness, provided that the slope increases with increasing roughness. It is established that the limit of endurance of samples and wheels in the roughness range Rz 0,4 ... ..40 does not practically decrease. Further increase in the surface roughness to Rz 250 μm reduces the endurance limits for symmetrical and pulsating cycles by 22 ... 24 %.

In the result of the study, the norms of the roughness of the transitional surfaces of gear wheels subjected to surface hardening by high-frequency currents are grounded. The results can also be used to perform calculations for the bending cyclic strength of gear wheels.

Keywords: surface hardening, high frequency currents, gears, bending fatigue strength, fillet surfaces, marine gear clutch, gear roughness.

For citation:
Salamex, Ali. "Research of bending endurance of gear wheels in marine gearboxes subjected to surface hardening by high-frequency currents." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2017): 402–410. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-402-410.

УДК 621.833.15:629.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ЗУБЬЕВ КОЛЕС СУДОВЫХ РЕДУКТОРОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

А. Саламех

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

В работе дано обоснование исследования влияния шероховатости и микронеровности в зоне переходных поверхностей зубчатых колес на их изгибную выносливость. Рассмотрена технология изготовления зубчатых колес и доля операции по ручному полированию впадин зубьев в общей трудоемкости их изготовления, а также применяемые марки стали для колес, упрочняемых поверхностной закалкой токами высокой частоты. Представлены требования к качеству поверхности зубьев после механической обработки. Определены конструкции круглых образцов, опытных зубчатых колес и условия испытаний. Представлены режимы закалки токами высокой частоты образцов и колес. Обоснованы диапазоны шероховатостей и значения для напряжений, при которых проводятся исследования. Произведена обработка результатов испытаний путем проведения регрессионного анализа, которые представлены аналитическим способом

в виде уравнения эмпирической линии регрессии и графическим способом в системе координат с осями σ, lg N. По результатам проведенных усталостных испытаний образцов и зубьев в области ограниченной выносливости можно сделать вывод о том, что наклон ветвей кривых усталостей для зубьев и образцов отличается в зависимости от шероховатости поверхности, причем наклон увеличивается с увеличением шероховатости. Установлено, что предел выносливости образцов и колес в диапазоне шероховатости Rz 0,4 … 40 практически не снижается. Дальнейшее увеличение шероховатости поверхности до Rz 250 мкм снижает пределы выносливости при симметричном и пульсирующем циклах на 22 … 24 %. В результате исследования обоснованы нормы шероховатости переходных поверхностей зубчатых колес, подвергаемых поверхностной закалке токами высокой частоты. Полученные результаты также могут быть использованы при выполнении расчетов на изгибную циклическую прочность зубчатых колес.

Ключевые слова: поверхностная закалка, токи высокой частоты, зубчатые колеса, изгибная выносливость, переходные поверхности, судовой редуктор, шероховатость зубьев.

Для цитирования:
Саламех А. Исследование изгибной выносливости зубьев колес судовых редукторов, подвергаемых поверхностной закалке токами высокой частоты / А. Саламех // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 10. — № 2. — С. 402–410. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-402-410.

Введение (Introduction)

Особенные условия, при которых эксплуатируются судовые редукторы, обусловливают при их ремонте замену зубчатых колес на новые с соблюдением технических требований чертежа. Для высоконагруженных судовых редукторов применяют цилиндрические зубчатые колеса с прямыми и с косыми зубьями. Зубчатые колеса изготавливаются из легированной стали с содержанием никеля и хрома и подвергаются поверхностной закалке токами высокой частоты. К зубчатым колесам предъявляют высокие требования по точности изготовления и качеству отделки [1].

Заготовками для зубчатых колес являются поковки, подвергаемые термическому улучшению из сталей марок 40ХН, 55ПП, 45ХН. После механической обработки цилиндрических поверхностей заготовки на токарном станке зубья нарезаются за две операции: черновое и чистовое зубофрезерование с применением черновых, чистовых и прецизионных червячных фрез. С целью достижения высокой точности изготовления колес ограничивают собственные вибрации станков путем их установки на виброизолирующем фундаменте.

Шероховатость переходных поверхностей зубьев колес назначают по Rz = 4,0 мкм, которая достигается ручным полированием с помощью пневмомашинок и абразивной ленты. Доля операции по полированию переходных поверхностей зубьев в общей трудоемкости изготовления зубчатых колес составляет 10 … 15 %. Высокие требования по качеству обработки переходных поверхностей объясняются стремлением к снижению концентрации напряжения от микронеровностей, отрицательно влияющей на предел выносливости зубьев [2]. Исследователи считают, что упрочнение материала в виде поверхностной закалки ликвидирует отрицательное влияние на изгибную выносливость мелких надрезов, какими являются следы механической обработки [3].

Существует научное мнение о том, что концентрация напряжений, обусловленная микрогеометрией поверхности после механической обработки, не распространяется глубоко в толщину металла, а локализуется в поверхностном слое с толщиной одного порядка с глубиной впадин. Упрочненный слой, получаемый на поверхности детали при термической обработке, обычно значительно превосходит по толщине слой, в котором имеет место концентрация напряжений [4].

В связи с ранее изложенным возникает вопрос об обоснованности высокого требования Rz = 4,0 мкм к шероховатости переходных поверхностей зубьев, подвергаемых поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ) [5]. Применение в качестве материала для зубчатых колес судовых редукторов стали повышенной прочности, подвергаемой поверхностной закалке ТВЧ, должно полностью компенсировать отрицательное влияние качества поверхности после процесса зубофрезерования на изгибную выносливость зубьев, которое в результате должно исключить операцию ручного полирования из технологического процесса изготовления зубчатых колес для высоконагруженных судовых редукторов.

В работах [6], [7] установлено влияние шероховатости переходных поверхностей цементированных зубьев колес на их ограниченную выносливость, а в предлагаемом исследовании решается вопрос об установлении влияния шероховатости переходных поверхностей и впадин зубьев, упрочненных поверхностной закалкой токами высокой частоты на их усталостную изгибную прочность.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Испытания на усталостную изгибную выносливость выполнялись на круглых образцах диаметром 10 мм с выточкой радиусом R = 50 мм, где поверхности выточек были обработаны на станках с числовым программным управлением с разной шероховатостью Rz, равной 0,4; 4,0; 40,0; 130,0 и 250,0 мкм [8], [9]. Режимы резания и шероховатости выточек представлены в табл. 1. Также усталостные испытания проводились на натурных зубчатых колесах модуля 6 мм, имеющих в области переходных поверхностей продольные риски, имитирующие следы от механической обработки данных поверхностей (табл. 2). Образцы и колеса изготовлены из стали 40 ХН и упрочнены поверхностной закалкой токами высокой частоты на ламповом генераторе мощностью 160 кВт при частоте тока 66000 Гц [10]. Режимы закалки ТВЧ представлены в табл. 3.

Таблица 1

Шероховатость выточек круглых образцов

Образец	Режимы резания			Rz, мкм
	V, об/мин	S, м/мин	t, мм	
Диаметр 10 мм, R = 50 мм	1800	0,02	0,5	0,4 … 0,5
	1400	0,04	0,5	3,8 … 4,0
	1400	0,22	1	36,0 … 40,0
	600	0,68	1	128,0 … 134,0
	450	1,62	1	248,0 … 258,0

Таблица 2

Шероховатость переходных поверхностей и впадин зубьев колес

	Номер зуба	Rz, мкм		Номер зуба	Rz, мкм
Колесо № 1	1 – 10	0,38 … 0,40	Колесо № 2	1 – 10	0,38 … 0,40
	11 – 20	4,0 … 4,2		11 – 20	4,0 … 4,2
	21 – 30	36,0 … 40,0		21 – 30	36,0 … 40,0
	31 – 40	128,0 … 134,0		31 – 40	128,0 … 134,0
	41 – 50	248,0 … 258,0		41 – 50	248,0 … 258,0

Таблица 3

Параметры закалки ТВЧ

Частота тока; Гц	250000	70000	8 000	2500	1000
Максимальная глубина закаленного слоя	2,5 … 3	2,5	5,5	10,0	16,0
Минимальная глубина закаленного слоя	0,3	1,0	1,3	2,4	3,6

Образцы, имеющие шероховатости выточек Rz 0,4; 4,0; 40,0; 130,0; 250,0, прошли испытания на экспериментальных установках круговым изгибом с постоянными амплитудными значениями напряжений при гармонической форме цикла на трех уровнях напряжений: 620, 545 и 470 МПа. Образцы с шероховатостью выточки Rz = 250 мкм были испытаны на уровнях напряжений 545, 470 и 395 МПа. Данные значения для напряжений были выбраны по следующим соображениям:

– верхний уровень напряжения принят равным 2/3 от предела прочности материала;

– нижний уровень напряжения составляет 50 % от предела прочности материала;

– средний уровень как среднеарифметическое от верхнего и нижнего уровней.

Результаты (Results)

Результаты испытаний круглы цилиндрических образцов представлены в табл. 4. Для построения наклонной ветви кривой усталости испытано по два образца диаметром 10 мм на трех уровнях напряжений. Значения амплитуд изгибного напряжения и число циклов до поломки показаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты усталостных испытаний образцов диаметра 10 мм

Шероховатость выточки Rz	Номер образца	Амплитуда напряжений σ, МПа	Число циклов до поломки $N\times105$	lg N	$\overline{\lg N}$
0,4 мкм	1	700	0,53	4,72	4,61
	2		0,32	4,50	
	3	650	1,26	5,10	5,29
	4		3,02	5,48	
	5	600	16,98	6,23	5,89
	6		3,55	5,55	
4 мкм	1	700	0,25	4,40	4,38
	2		0,22	4,35	
	3	650	1,26	5,10	5,28
	4		2,82	5,45	
	5	600	14,13	6,15	5,80
	6		2,82	5,45	
40 мкм	1	700	0,14	4,15	4,10
	2		0,11	4,05	
	3	650	0,49	4,69	4,96
	4		1,70	5,23	
	5	600	5,37	5,73	5,49
	6		1,78	5,25	
130 мкм	1	600	0,41	4,61	4,56
	2		0,32	4,51	
	3	550	1,78	5,25	5,36
	4		2,95	5,47	
	5	500	60,26	6,78	6,62
	6		28,18	6,45	
250 мкм	1	600	0,05	3,70	3,65
	2		0,04	3,60	
	3	550	0,30	4,48	4,55
	4		0,42	4,62	
	5	500	2,24	5,35	5,60
	6		6,92	5084	

После обработки результатов испытаний путем проведения регрессионного анализа [11] в системе координат с осями σ, lg N были получены уравнения эмпирической линии регрессии для образцов с диаметром 10 мм и шероховатостью Rz, равной 0,4; 4,0; 40; 130; 250 мкм:

$$\lg N = 13{,}58 - 0{,}0128\sigma;$$

$$\lg N = 14{,}41 - 0{,}0143\sigma;$$

$$\lg N = 13{,}89 - 0{,}0139\sigma;$$

$$\lg N = 16{,}81 - 0{,}0206\sigma;$$

$$\lg N = 15{,}30 - 0{,}0195\sigma.$$

На основе полученных уравнений были построены кривые усталости образцов диаметром 10 мм с шероховатостью Rz, равной 0,4; 4,0; 40; 130; 250 мкм, которые представлены на рис. 1.

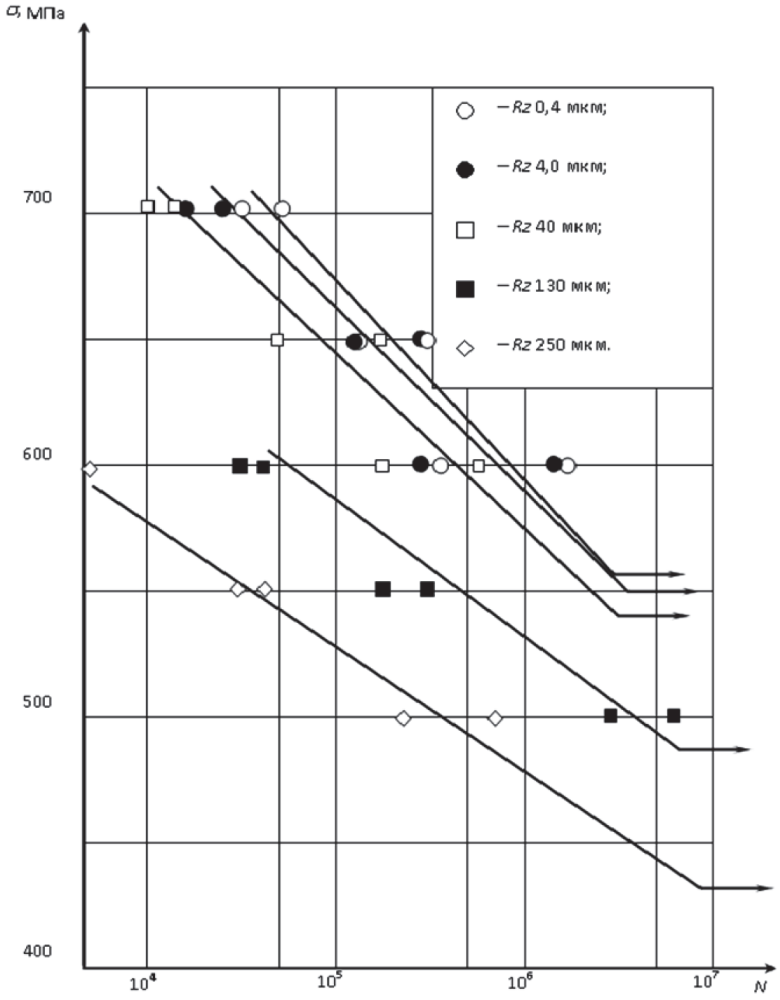


Рис. 1. Кривые усталости поверхностно-закаленных ТВЧ образцов диаметра 10 мм при изменении шероховатости выточек в диапазоне 0,4 … 250,0 мкм

Испытания закаленных зубьев на изгибную усталость проводили при пульсирующем цикле нагружения. Для построения кривой усталости было испытано по два зуба с одинаковой шероховатостью переходной поверхности на таких же уровнях напряжений, как для круглых образцов.

Результаты испытания приведены в табл. 5, где представлено число циклов, вызывающих поломку зубьев, и амплитуды напряжений [12]. После обработки результатов испытаний путем проведения регрессионного анализа в системе координат с осями σ, lg *N* были получены уравнения эмпирической линии регрессии для зубьев с шероховатостью переходных поверхностей Rz, равной 0,4; 4,0; 40; 130; 250 мкм:

$$\lg N = 12{,}97 - 0{,}0115\sigma;$$

$$\lg N = 13{,}26 - 0{,}0124\sigma;$$

$$\lg N = 13{,}93 - 0{,}0143\sigma;$$

$$\lg N = 15{,}78 - 0{,}0196\sigma;$$

$$\lg N = 14{,}14 - 0{,}0185\sigma.$$

По полученным уравнениям были построены кривые усталости зубьев колес модуля 6 мм с шероховатостью Rz, равной 0,4; 4,0; 40; 130; 250 мкм, которые представлены на рис. 2.

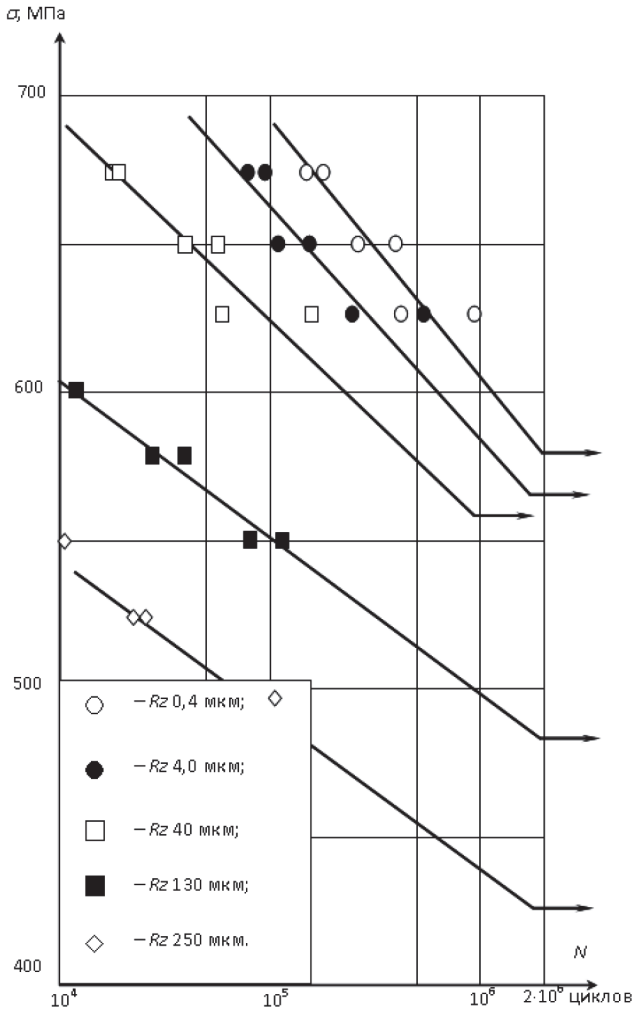


Рис. 2. Кривые усталости зубьев колеса модуля 6 мм
с шероховатостью переходных поверхностей в диапазоне 0,4 … 250 мкм

Таблица 5

Результаты усталостных испытаний зубьев экспериментальных колес модуля 6 мм

Шероховатость переходной поверхности Rz	Номер образца	Амплитуда напряжений σ, МПа	Число циклов до поломки 105*N*	lg *N*	$\overline{\lg N}$
0,4 мкм	1	675	1,48	5,17	5,21
	2		1,78	5,25	
	3	650	3,89	5,59	5,50
	4		2,57	5,41	
	5	625	9,12	5,96	5,79
	6		4,07	5,61	
4 мкм	1	675	0,93	4,97	4,93
	2		0,78	4,89	
	3	650	1,18	5,07	5,13
	4		1,51	5,18	
	5	625	5,25	5,72	5,55
	6		2,40	5,38	
40 мкм	1	675	0,18	4,25	4,27
	2		0,19	4,28	
	3	650	0,39	4,59	4,67
	4		0,56	4,75	
	5	625	0,59	4,77	4,98
	6		1,55	5,19	

Таблица 5
(*Окончание*)

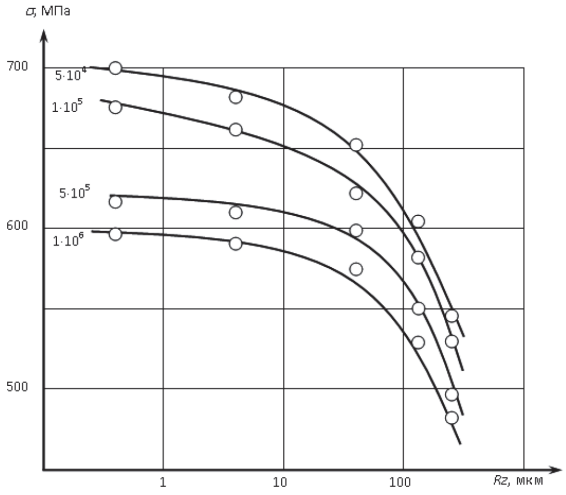
130 мкм	1	600	0,11	4,04	4,01
	2		0,09	3,98	
	3	575	0,28	4,44	4,52
	4		0,39	4,59	
	5	550	1,18	5,07	4,99
	6		0,81	4,91	
250 мкм	1	550	0,1	4,01	3,99
	2		0,09	3,96	
	3	525	0,26	4,41	4,38
	4		0,22	4,35	
	5	500	1,02	5,01	4,91
	6		0,65	4,81	

Обсуждение (Discussion)

По результатам проведенных усталостных испытаний образцов и зубьев в вышеуказанном диапазоне шероховатости в области ограниченной выносливости видно, что наклон ветвей кривых усталости для зубьев и образцов отличается в зависимости от шероховатости поверхности, причем он увеличивается с увеличением шероховатости.

Определенные на базах 5·104, 1·105, 5·105, 1·106 циклов зависимости ограниченных пределов выносливости от шероховатости для образцов диаметром 10 мм представлены на рис. 3, *а*, а эта же зависимость для зубьев экспериментальных колеса модуля 6 мм на базах 5 × 104, 1 × 105 циклов приведена на рис. 3, *б*.

а)



б)

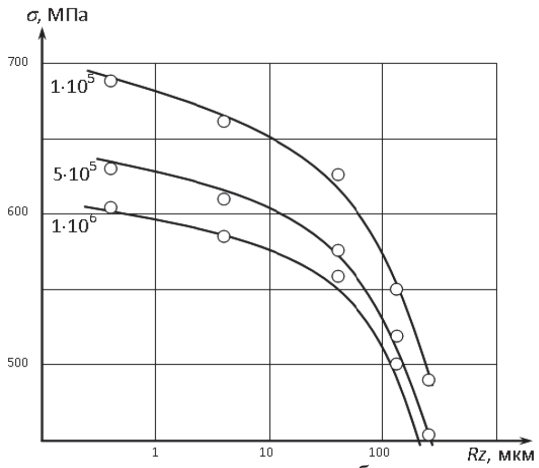


Рис. 3. Зависимости ограниченных пределов выносливости образцов диаметра 10 мм от шероховатости (*а*); выносливости зубьев экспериментальных колес модуля 6 мм от шероховатости (*б*)

Результаты испытаний показывают, что средние значения пределов выносливости незначительно зависят от шероховатости поверхности в диапазоне Rz = 0,4 … 40 мкм. Дальнейшее увеличение шероховатости поверхности до Rz = 250 мкм снижает пределы выносливости при симметричном и пульсирующем циклах на 22 … 24 % для образцов диаметром 10 мм и 26 … 28 % для зубьев экспериментальных колес модуля 6 мм.

Заключение (Conclusion)

Результаты исследования могут быть использованы при выполнении расчетов на прочность зубчатых колес: на выносливость при изгибе по ГОСТ 21354-87 [13]; при расчетах деталей, подвергаемых поверхностной закалке, по ГОСТ 25504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости» и РД 50-607-86 «Расчеты и испытания в машиностроении», а также при назначении шероховатости переходных поверхностей зубьев колес, подвергаемых поверхностному упрочнению закалкой токами высокой частотой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корнилович С. А.* Повышение контактной выносливости поверхностного слоя зубьев шестерен при их изготовлении и ремонте / С. А. Корнилович // Омский научный вестник. — 2012. — № 2 (110). — С. 75–76.

2. *Руденко С. П.* Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С. П. Руденко, А. Л. Валько // Вестник машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 5–11.

3. *Katsuyuki M.* Повышение усталостной прочности шестерен посредством контурного индукционного воздействия и использования дробеструйной обработки / M. Katsuyuki, E. Hirohito, K. Kazuhiro [и др.] // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A. — 1995-65. — № 637. — С. 92–97.

4. *Чернявский И. С.* Анализ контактной и изгибной выносливости зубчатых колес трансмиссии трактора Т-150К / И. С. Чернявский, А. В. Устиненко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». — 2013. — № 40 (1013). — С. 186–190.

5. *Саламех А.* Обоснование норм шероховатости переходных поверхностей зубьев, упрочняемых поверхностной закалкой токами высокой частоты, при ремонте судовых тяжелонагруженных зубчатых передач: дис. … канд. техн. наук / А. Саламех. — Астрахань, 2005. — 167 с.

6. *Рубан А. Р.* Ограниченная выносливость цементируемых зубьев колес судовых редукторов / А. Р. Рубан // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 56–62.

7. *Шеховцева Е. В.* Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки / Е. В. Шеховцева, Т. В. Шеховцева // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2017. — Т. 13. — № 8 (152). — С. 374–378.

8. *Школьник Л. М.* Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. — М.: Металлургия, 1978. — 304 с.

9. *Кашкаров А. А.* Методика исследования влияния шероховатости переходных поверхностей зубьев, упрочненных поверхностным пластическим деформирование, на их изгибную выносливость / А. А. Кашкаров, В. А. Мамонтов // Пробл. динамики и прочности исполнительных механизмов и машин: Материалы научн. конф., Астрахань, 1 – 5 окт., 2002. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2002. — С. 278–280.

10. *Демидов П. Н.* Оптимальный выбор материала и способа поверхностного упрочнения высоконагруженных зубчатых колес с целью повышения сопротивления заеданию / П. Н. Демидов, М. Ю. Семенов, В. А. Нелюб // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2012. — № 4 (36). — С. 22–27.

11. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.

12. *Fabre A.* Microgeometrical influences on micropitting fatigue damage: multi-scale analysis / A. Fabre, L. Barrallier, M. Desvignes, H. P. Evans, M. P. Alanou // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2011. — Vol. 225. — № 6. — Pp. 419–427. DOI: 10.1177/1350650110396980.

13. ГОСТ 21354-87-1989. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 76 с.

REFERENCES

1. Kornilovich, S.A. "Increasing contact hardiness of toothed wheel surface during manufacturing and repairing." *Omsk Scientific Bulletin* 2(110) (2012): 75–76.

2. Rudenko, S.P., and A.L. Val'ko. "Features of analysis of gear wheels of transmissions on deep back-to-back endurance." *Bulletin of mechanical engineering* 11 (2015): 5–11.

3. Katsuyuki, Matsui, Eto Hirohito, Kawasaki Kazuhiro, et al. "Povyshenie ustalostnoi prochnosti shesteren posredstvom konturnogo induktsionnogo vozdeistviya i ispol'zovaniya drobestruinoi obrabotki." *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A* 637 (1995-65): 92–97.

4. Chernyavskii, I.S., and A.V. Ustinenko. "Analiz kontaktnoi i izgibnoi vynoslivosti zubchatykh koles transmissii traktora T-150K." *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* 40(1013) (2013): 186–190.

5. Salamekh, A. Obosnovanie norm sherokhovatosti perekhodnykh poverkhnostei zub'ev, uprochnyaemykh poverkhnostnoi zakalkoi tokami vysokoi chastoty, pri remonte sudovykh tyazhelonagruzhennykh zubchatykh peredach. PhD dis. Astrakhan', 2005.

6. Ruban, Anatoliy Rashidovich. "Restricted endurance of cemented teeth of wheels of ship reducers." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2011): 56–62.

7. Shehovtseva, E.V., and T.V. Shehovtseva. "Strengthening of surface layer of gears working surfaces with use of thermochemical processing." *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* 13.8(152) (2017): 374–378.

8. Shkol'nik, L.M. *Metodika ustalostnykh ispytanii: Spravochnik*. M.: Metallurgiya, 1978.

9. Kashkarov, A.A., and V.A. Mamontov. "Metodika issledovaniya vliyaniya sherokhovatosti perekhodnykh poverkhnostei zub'ev, uprochnennykh poverkhnostnym plasticheskim deformirovanie, na ikh izgibnuyu vynoslivost'." *Probl. dinamiki i prochnosti ispolnitel'nykh mekhanizmov i mashin: Materialy nauchn. Konf.* Astrakhan': Izd-vo AGTU, 2002: 278–280.

10. Demidov, P.N., M.Yu. Semenov, and V.A. Nelyub. "Optimal choice of material and surface hardening method of gear wheels for galling resistance increasing." *Bulletin of Bryansk State Technical University* 4(36) (2012): 22–27.

11. Stepnov, M.N. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytanii: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1985.

12. Fabre, Agnes, L. Barrallier, M. Desvignes, H.P. Evans, and M.P. Alanou. "Microgeometrical influences on micropitting fatigue damage: multi-scale analysis." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 225.6 (2011): 419–427. DOI: 10.1177/1350650110396980.

13. Russian Federation. State Standard GOST 21354-87-1989. Peredachi zubchatye tsilindricheskie evol'ventnye vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost'. M.: Izd-vo standartov, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Саламех Али — доцент ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» 414025, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 16 e-mail: *a.salameh@mail.ru*	**Salamex, Ali** — Associate professor Astrakhan State Technical University 16, Tatisheva Str., Astrakhan, 414025, Russian Federation e-mail: *a.salameh@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2018 г.
Received: February 20, 2018.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419

ANALYSIS OF INFLUENCE OF NON-PROPORTIONAL DISTRIBUTION OF LOAD BETWEEN PARALLELLY OPERATING GENERATORS FOR THE POWER FACTOR OF LOADING OF EACH GENERATOR

A. A. Vinogradov

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

The article analyzes the influence of the disproportionate distribution of active and reactive components of the total electric power on the coefficients of the capacities that fall on each of the DGS operating in parallel. Expressions are given showing the dependence of load power factor for a generator set from nature of the total electrical load and the ratio of distributed generators active and reactive components of load current. It is shown that proportional distribution of the load, the power factors of the loads attributable to each of the DGS operated in parallel are the same and equal to the power factor of the total electrical load. Produced an overview of the requirements of the classification societies to how should be distributed the load between the parallel running of diesel generator units, for example, Rules for the classification and construction of sea-going ships of Russian Maritime register of shipping, and permissible deviations from the required distribution of the electric load. The possibility of using the method of disproportionate distribution of the electric load between parallel diesel generator sets, but within the permissible deviations, to reduce the total specific fuel consumption, in view of the difference in the characteristic dependence of the specific fuel consumption q(P, cosФ) on the load power and power factor for each generator set, which take place even for the generating units of the same nominal power and series, and, in particular, for a long period of operation, is analyzed. An example of proportional and disproportionate load distribution for two generator sets of different rated capacities with specified values of the total load current, the ratio of the nominal capacity of the generators (coefficient of proportionality) and the pre-determined load distribution between them is given.

Keywords: diesel-generator set, specific fuel consumption, parallel operation, proportional distribution, disproportionate power distribution, load power factor, load current, active and reactive components.

For citation:
Vinogradov, Andrey A. "Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

УДК 621.313.322-843.6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ КАЖДОГО ГЕНЕРАТОРА

А. А. Виноградов

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

В статье проводится анализ того, как влияет непропорциональное распределение активных и реактивных составляющих общей электрической мощности на коэффициенты мощностей, приходящихся на каждый из дизель-генераторных агрегатов (ДГА), работающих параллельно. Приведены выражения, отображающие зависимость коэффициента мощности нагрузки того или иного генераторного агрегата

от характера общей электрической нагрузки и от соотношения распределяемых между генераторами активных и реактивных составляющих тока нагрузки. Показано, что при пропорциональном распределении нагрузки коэффициенты мощности нагрузок, приходящихся на каждый из ДГА, работающих параллельно, оказываются одинаковыми и равными коэффициенту мощности общей электрической нагрузки. Выполнен обзор требований классификационных обществ к тому, как должна распределяться нагрузка между параллельно работающими ДГА на примере Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства и рассмотрены допустимые отклонения от требуемого распределения электрической нагрузки. Проанализирована возможность использования приведенного метода непропорционального распределения электрической нагрузки между параллельно работающими ДГА в рамках допустимых отклонений для уменьшения суммарного удельного расхода топлива ввиду неодинаковости характерных зависимостей удельного расхода топлива q (P, cosφ*) от мощности нагрузки и коэффициента мощности для каждого генераторного агрегата, которые имеют место даже для генераторных агрегатов одинаковой номинальной мощности и серии, и в особенности при длительном периоде эксплуатации. Приведены примеры пропорционального и непропорционального распределения нагрузки для двух генераторных агрегатов различных номинальных мощностей с заданными значениями общего тока нагрузки, отношения номинальных мощностей генераторов (коэффициент пропорциональности) и предполагаемого распределения нагрузки между ними.*

Ключевые слова: дизель-генераторный агрегат, удельный расход топлива, параллельная работа, пропорциональное распределение, непропорциональное распределение мощности, коэффициент мощности нагрузки, ток нагрузки, активная и реактивная составляющие.

Для цитирования:
Виноградов А. А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

Введение (Introduction)

При параллельной работе дизель-генераторных агрегатов (ДГА) общая электрическая нагрузка должна распределяться между ними согласно требованиям Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) следующим образом [1]:

– при параллельной работе генераторов переменного тока в диапазоне 20 – 100 % общей нагрузки ее распределение на каждый генератор должно происходить пропорционально их мощностям и не должно отличаться более чем на 15 % от расчетной нагрузки большего из генераторов или на 25 % от расчетной нагрузки рассматриваемого генератора в зависимости от того, что меньше;

– генераторы переменного тока, предназначенные для параллельной работы, должны снабжаться такой системой компенсации реактивного напряжения, чтобы во время параллельной работы распределение реактивной нагрузки между генераторами не отличалось от их пропорциональной мощности более чем на 10 % номинальной реактивной нагрузки наибольшего генератора или не более чем на 25 % номинальной мощности наименьшего генератора, если это значение меньше вышеуказанного.

В работе [2] изложена методика непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА с целью минимизации удельного расхода топлива (УРТ) и приведено выражение, отражающее зависимость УРТ от нагрузки генераторного агрегата и коэффициента мощности $q(P, \cos\varphi)$. Вывод данного выражения выполнен в работах [3] – [5]. Ввиду неодинаковости характерных зависимостей УРТ для каждого из параллельно работающих генераторных агрегатов (особенно для генераторных агрегатов, эксплуатирующихся в течение длительного времени), манипуляции с распределением мощности и / или изменением коэффициента мощности, приходящейся на тот или иной ДГА, может обеспечить снижение расхода топлива [6] – [8]. В статье исследуется возможность изменения коэффициентов мощности нагрузки каждого из параллельно работающих генераторов путем непропорционального распределения между ними активных и реактивных составляющих тока нагрузки.

Вычисления и обсуждения (Calculations and Discussions)

Рассмотрим два ДГА, работающих в параллель на общую электрическую нагрузку.

Пусть $P_{1н}$, кВт — номинальная мощность первого ДГА; $P_{2н}$, кВт — номинальная мощность второго ДГА; $P_{нагр}$, кВт — нагрузка на шинах главного распределительного щита (ГРЩ); cos φ — коэффициент мощности нагрузки; $k = P_{1н} / P_{2н}$ — отношение номинальных мощностей первого и второго генераторов, или коэффициент пропорциональности; I, А — полный ток нагрузки.

Предположим, что частота электрического тока f, Гц, и напряжение U, В, постоянны и во время параллельной работы ДГА не изменяются, что обеспечивается автоматическими устройствами (автоматические регуляторы напряжения, устройство регулирования частоты напряжения).

Полный ток нагрузки I имеет активную $I_а$ и реактивную $I_р$ составляющие: $I = I_а + i \cdot I_р$, где i — мнимая единица.

Обозначим I_1 — ток нагрузки первого ДГА; I_2 — ток нагрузки второго ДГА.

Тогда можно записать:

$$I = I_1 + I_2;$$

$$I_1 = I_{а1} + iI_{р1};$$

$$I_2 = I_{а2} + iI_{р2},$$

где $I_{а1}$, $I_{а2}$ — активные составляющие токов нагрузки первого и второго ДГА соответственно; $I_{р1}$, $I_{р2}$ — реактивные составляющие токов нагрузки первого и второго ДГА соответственно.

Таким образом, получим:

$$I_а = I_{а1} + I_{а2}; \quad (1)$$

$$I_р = I_{р1} + I_{р2}. \quad (2)$$

Как указано ранее, при параллельно работе ДГА полный ток нагрузки должен быть распределен между ними пропорционально их номинальным ($P_н$) мощностям, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_{1н}}{P_{2н}} = k. \quad (3)$$

Добиться выполнения этого условия можно, если активные и реактивные составляющие токов нагрузки первого и второго генераторов будут распределены пропорционально номинальным мощностям ДГА, т. е.

$$\frac{I_{а1}}{I_{а2}} = \frac{I_{р1}}{I_{р2}} = k. \quad (4)$$

Покажем это. Так как $\frac{I_{а1}}{I_{а2}} = k$ и $\frac{I_{р1}}{I_{р2}} = k$, то $I_{а1} = kI_{а2}$ и $I_{р1} = kI_{р2}$.

Тогда $I_1 = I_{а1} + iI_{р1} = kI_{а2} + ikI_{р2} = k(I_{а2} + iI_{р2}) = kI_2$ и $\frac{I_1}{I_2} = \frac{kI_2}{I_2} = k$.

При обеспечении пропорционального распределения тока нагрузки между параллельно работающими ДГА коэффициент мощности нагрузки каждого из ДГА ($\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$) будет равен коэффициенту мощности общей электрической нагрузки cos φ, т. е. $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi$. Покажем это.

Коэффициент мощности общей электрической нагрузки

$$\cos\varphi = \frac{I_а}{\sqrt{I_а^2 + I_р^2}}. \quad (5)$$

Коэффициент мощности нагрузки первого ДГА

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{а1}}{\sqrt{I_{а1}^2 + I_{р1}^2}}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности нагрузки второго ДГА

$$\cos\varphi_2 = \frac{I_{a2}}{\sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2}}. \quad (7)$$

Сравним cos φ и cos φ_1:

$$\frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}} \nu \frac{I_{a1}}{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}} \Rightarrow \frac{I_a^2}{I_a^2 + I_p^2} \nu \frac{I_{a1}^2}{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} \Rightarrow$$

$$I_a^2 \left(I_{a1}^2 + I_{p1}^2\right) \nu I_{a1}^2 \left(I_a^2 + I_p^2\right) \Rightarrow$$

$$I_a^2 I_{a1}^2 + I_a^2 I_{p1}^2 \nu I_{a1}^2 I_a^2 + I_{a1}^2 I_p^2 \Rightarrow I_a^2 I_{p1}^2 \nu I_{a1}^2 I_p^2 \Rightarrow$$

$$I_a I_{p1} \nu I_{a1} I_p.$$

По условиям задач (1) и (2) имеем:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} \text{ и } I_p = I_{p1} + I_{p2}$$

$$I_a I_{p1} \nu I_{a1} I_p \Rightarrow \left(I_{a1} I_{p1} + I_{a2} I_{p1}\right) \nu \left(I_{a1} I_{p1} + I_{a1} I_{p2}\right) \Rightarrow$$

$$I_{a2} I_{p1} \nu I_{a1} I_{p2} \Rightarrow \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \nu \frac{I_{p1}}{I_{p2}}.$$

По условию задачи (4)

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}},$$

значит, cos φ_1 = cos φ, что и требовалось показать. Аналогично можно продемонстрировать равенство cos φ_2 = cos φ.

Таким образом, при пропорциональном распределении между параллельно работающими ДГА активных и реактивных составляющих тока нагрузки обеспечивается равенство cos φ_1 = cos φ_2 = cos φ.

Рассмотрим ситуацию, когда $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} \neq k$ и / или $\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \neq k$, а $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k_a$ и $\frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k_p$, где k_a и k_p — некоторые коэффициенты, отличные от k, причем $k_a \neq k_p$.

В этой ситуации определим коэффициент мощности нагрузки cos φ_1 первого ДГА.

Так как

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k_a \text{ и } \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k_p,$$

то

$$I_{a2} = \frac{I_{a1}}{k_a} \text{ и } I_{p2} = \frac{I_{p1}}{k_p}. \quad (8)$$

По условию

$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = I \cdot \cos\varphi \text{ и } I_{p1} + I_{p2} = I_p = I \cdot \sin\varphi. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) получаем

$$I_{a1} \cdot \left(\frac{1}{k_a} + 1\right) = I \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow I_{a1} = \frac{k_a}{k_a + 1} \cdot I \cdot \cos(\varphi); \quad (10)$$

$$I_{p1} \cdot \left(\frac{1}{k_p} + 1\right) = I \cdot \cos\varphi \Rightarrow I_{p1} = \frac{k_p}{k_p + 1} \cdot I \cdot \sin\varphi. \quad (11)$$

Тогда

$$\cos^2\varphi_1 = \frac{I_{a1}^2}{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \frac{1}{1+\dfrac{I_{p1}^2}{I_{a1}^2}} = \frac{1}{1+\dfrac{\left(\dfrac{k_p}{k_p+1}\right)^2 \cdot I^2 \cdot \sin^2\varphi}{\left(\dfrac{k_a}{k_a+1}\right)^2 \cdot I^2 \cdot \cos^2\varphi}} = \tag{12}$$

$$= \frac{1}{1+\mathrm{tg}^2\,\varphi \cdot \left(\dfrac{k_p}{k_a}\right)^2 \cdot \left(\dfrac{k_a+1}{k_p+1}\right)^2}.$$

Аналогично получим выражение для коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi_2$ второго ДГА

$$\cos^2\varphi_2 = \frac{1}{1+\mathrm{tg}^2\,\varphi \cdot \left(\dfrac{k_a+1}{k_p+1}\right)^2}. \tag{13}$$

Из выражений (12) и (13) видно, что коэффициенты мощности нагрузок, приходящихся на первый и второй ДГА, зависят от характера общей электрической нагрузки φ и соотношения распределяемых между генераторами активных и реактивных составляющих тока нагрузки.

Следует отметить, что если $k_a = k_p$, то

$$\cos^2\varphi_1 = \cos^2\varphi_2 = \frac{1}{1+\mathrm{tg}^2\,\varphi}. \tag{14}$$

Исходя из основного тригонометрического тождества, равенство (14) возможно только при условии, если $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$. Отсюда можно сделать вывод о том, что добиться равенства коэффициентов мощности нагрузки первого и второго ДГА коэффициенту мощности общей нагрузки можно при обеспечении равенства $\dfrac{I_{a1}}{I_{a2}} = \dfrac{I_{p1}}{I_{p2}}$, при этом отношения активных и реактивных составляющих тока нагрузки первого и второго ДГА не обязательно должны быть равны коэффициенту пропорциональности k.

Изменяя соотношения активных и реактивных составляющих тока нагрузки, можно добиться тех или иных значений коэффициентов мощности, приходящихся на первый и второй ДГА. При этом следует отслеживать выполнение требований РМРС в части допустимых отклонений при распределении нагрузки между параллельно работающими ДГА. Метод варьирования коэффициентов мощности может быть полезен при поиске оптимального суммарного расхода топлива при параллельной работе, так как удельный расход топлива (УРТ) зависит от коэффициента мощности нагрузки.

В качестве примера рассмотрим следующую задачу. Исходные данные: пусть общий ток нагрузки I = 600 А, $\cos\varphi$ = 0,8. Тогда I_a = 480 А и I_p = 360 А.

Обозначим I_1 — полный ток первого ДГА, I_{a1} — активная составляющая тока нагрузки первого ДГА, I_{p1} — реактивная составляющая тока нагрузки первого ДГА; $\cos\varphi_1$ — коэффициент мощности нагрузки первого ДГА; I_2 — полный ток второго ДГА; I_{a2} — активная составляющая тока нагрузки второго ДГА; I_{p2} — реактивная составляющая тока нагрузки второго ДГА; $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки второго ДГА. Предположим, что отношение номинальных мощностей составляет k = 1,5. Варианты распределения нагрузки между ДГА и соответствующие данным вариантам распределения нагрузки параметры электрической энергии приведены в следующей таблице:

Распределение нагрузки между дизель-генераторными агрегатами

<table>
<tr><td colspan="3">Значения параметров I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, cos φ_1, cos φ_2
при пропорциональном распределении нагрузки</td></tr>
<tr><td>I_{a1}, А</td><td colspan="2">288</td></tr>
<tr><td>I_{p1}, А</td><td colspan="2">216</td></tr>
<tr><td>cos φ_1</td><td colspan="2">0,8</td></tr>
<tr><td>I_1, А</td><td colspan="2">360</td></tr>
<tr><td>I_{a2}, А</td><td colspan="2">192</td></tr>
<tr><td>I_{p2}, А</td><td colspan="2">144</td></tr>
<tr><td>cos φ_2</td><td colspan="2">0,8</td></tr>
<tr><td>I_2, А</td><td colspan="2">240</td></tr>
<tr><td colspan="3">Значения параметров I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, cos φ_1, cos φ_1
при непропорциональном распределении нагрузки ($k_a = 2$; $k_p = 1{,}8$)</td></tr>
<tr><td>I_{a1}, А</td><td>320</td><td rowspan="7">При данном распределении нагрузки отклонение по полному току от пропорционального распределения для первого ДГА составляет 9,7 %, а для второго — 14,5 %; отклонение по реактивному току для первого — 7,14 %; для второго — 10,7 %. Требования правил РМРС выполняются</td></tr>
<tr><td>I_{p1}, А</td><td>231,43</td></tr>
<tr><td>cos φ_1</td><td>0,810298</td></tr>
<tr><td>I_1, А</td><td>394,9</td></tr>
<tr><td>I_{a2}, А</td><td>160</td></tr>
<tr><td>I_{p2}, А</td><td>128,57</td></tr>
<tr><td>cos φ_2</td><td>0,779509</td></tr>
<tr><td>I_2, А</td><td>205,25</td></tr>
<tr><td colspan="3">Значения параметров I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, cos φ_1, cos φ_2
при непропорциональном распределении нагрузки ($k_a = 2$; $k_p = 2$)</td></tr>
<tr><td>I_{a1}, А</td><td>320</td><td rowspan="7">При данном распределении нагрузки отклонение по полному току от пропорционального распределения для первого ДГА составляет 11,1 %, а для второго — 16,7 %; отклонение по реактивному току для первого — 11,1 %; для второго — 16,7 %. Требования правил РМРС выполняются</td></tr>
<tr><td>I_{p1}, А</td><td>240</td></tr>
<tr><td>cos φ_1</td><td>0,8</td></tr>
<tr><td>I_1, А</td><td>400</td></tr>
<tr><td>I_{a2}, А</td><td>160</td></tr>
<tr><td>I_{p2}, А</td><td>120</td></tr>
<tr><td>cos φ_2</td><td>0,8</td></tr>
<tr><td>I_2, А</td><td>200</td></tr>
</table>

Зная полный ток нагрузки, характер нагрузки, отношение номинальных мощностей генераторов, между которыми нагрузка делится, а также то, как планируется распределять активные и реактивные составляющие тока нагрузки (k_a, k_p), можно определить:

1) величину активного тока ΔI_a, на которую нужно изменить активные составляющие токов параллельно работающих ДГА при их распределении пропорционально мощностям ДГА (для одного уменьшить на эту величину, для другого увеличить), чтобы добиться заданного соотношения;

2) величину реактивного тока ΔI_p, на которую нужно изменить реактивные составляющие токов параллельно работающих ДГА при их распределении пропорционально мощностям ДГА (для одного уменьшить на эту величину; для другого увеличить), чтобы добиться заданного соотношения.

При пропорциональном распределении нагрузки отношение активных составляющих токов первого и второго генераторов, согласно условию задачи (4), — $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k$, если активную составля-

ющую тока одного из генераторов уменьшить на величину ΔI_a, а другую, соответственно, увеличить на то же значение, получим

$$\frac{I_{a1} - \Delta I_a}{I_{a2} + \Delta I_a} = k_a . \quad (15)$$

Решив систему, состоящую из выражений (4) и (15), относительно I_{a1} и I_{a2} получим:

$$I_{a2} = \Delta I_a \cdot \frac{(1 + k_a)}{(k - k_a)}; \quad (16)$$

$$I_{a1} = \Delta I_a \cdot \frac{k \cdot (1 + k_a)}{(k - k_a)}. \quad (17)$$

Сложив выражения (16) и (17) и с учетом (9), можно выразить ΔI_a:

$$\Delta I_a = I \cdot \cos\varphi \cdot \frac{(k - k_a)}{(1 + k_a) \cdot (1 + k)} . \quad (18)$$

Аналогично определяется ΔI_p:

$$\Delta I_p = I \cdot \sin\varphi \cdot \frac{(k - k_p)}{(1 + k_p) \cdot (1 + k)} . \quad (19)$$

Из выражений (18), (19) можно выразить k_a и k_p соответственно:

$$k_a = \frac{I_a k - \Delta I_a (1 + k)}{I_a + \Delta I_a (1 + k)}; \quad (20)$$

$$k_p = \frac{I_p k - \Delta I_p (1 + k)}{I_p + \Delta I_p (1 + k)} . \quad (21)$$

Зная ток нагрузки, характер нагрузки и величину тока, на которую та или иная составляющая тока нагрузки будет изменяться, с помощью выражений (20) и (21) можно определить, как они при этом будут соотноситься. Вопросы оптимизации работы судовых электроэнергетических систем и минимизации удельного расхода топлива также рассмотрены в работах [9] – [13].

Выводы (Summary)

В работе получены выражения (12) и (13) для коэффициентов мощности двух параллельно работающих ДГА при непропорциональном распределении активных и реактивных составляющих токов нагрузки, приходящихся на каждый из генераторных агрегатов. Из выражений видно, что эти коэффициенты зависят от характера общей электрической нагрузки и от того, как соотносятся между собой активные и реактивные составляющие токов каждого из ДГА. Изменение этих соотношений в пределах требований РМРС, предъявляемых к распределению мощности между параллельно работающими ДГА, позволяет получить нужную величину коэффициента мощности. В связи с тем, что УРТ напрямую зависит от нагрузки и коэффициента мощности нагрузки, и при параллельной работе ДГА, имеющих неодинаковые характерные зависимости УРТ от мощности и коэффициента мощности, пропорциональное распределение мощностей может оказаться неэффективным с точки зрения экономии топлива предложенный метод позволит осуществить поиск такого распределения нагрузки, при котором расход топлива минимальный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: РМРС, 2017. — 807 с.
2. Пат. 2645387 Российская Федерация, МПК H 02 P 9/04, F 02 D 25/00. Способ распределения на-

грузки между параллельно работающими судовыми дизель-генераторными агрегатами / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов, С. Е. Кузнецов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — № 2017118845; заявл. 30.05.2017; опубл. 21.02.2018. — Бюл. № 6.

3. *Кузнецов С. Е.* Потери и коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 67–71.

4. *Кузнецов С. Е.* Влияние нагрузки и коэффициента мощности на коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 5. — С. 29–32.

5. *Кузнецов С. Е.* Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель генераторного агрегата / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 6. — С. 30–32.

6. *Кузнецов С. Е.* Удельный расход топлива судового дизель-генератора / С. Е. Кузнецов, А. А. Виноградов // Тезисы докладов V МНК «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», 21 – 27 мая 2017. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2017. — С. 141–143.

7. *Виноградов А. А.* Распределение нагрузки при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов с учетом расхода топлива / А. А. Виноградов, С. Е. Кузнецов // Сб. тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 21–22.

8. *Кузнецов С. Е.* Удельный расход топлива и потери мощности судового дизель-генератора / С. Е. Кузнецов, О. О. Башкирев, А. А. Виноградов // Транспортное дело России. — 2017. — № 5. — С. 176–179.

9. *Виноградов А. А.* Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

10. *Rao K. S.* Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption / K. S. Rao, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, A. K. Gupta // Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE. — IEEE, 2015. — Pp. 004726–004731. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392838.

11. *Chauhan P. J.* Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture / P. J. Chauhan, K. S. Rao, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, A. K. Gupta // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015 IEEE PES Asia-Pacific. — IEEE, 2015. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/APPEEC.2015.7380963.

12. *Rao S. S.* Engineering optimization: theory and practice / S. S. Rao. — John Wiley & Sons, 2009. — 840 p. DOI:10.1002/9780470549124.

13. *Wu W.* Optimal power generation scheduling of a shipboard power system / W. Wu, D. Wang, A. Arapostathis, K.Davey // Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS'07. IEEE. — IEEE, 2007. — Pp. 519–522. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372135.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov.* SPb.: RMRS, 2017.

2. Alekseev, N.A., A.A. Vinogradov, and S.E. Kuznetsov. RU 2 645 387 C1, IPC H 02 P 9/04, F 02 D 25/00. Sposob raspredeleniya nagruzki mezhdu parallel'no rabotayushchimi sudovymi dizel'-generatornymi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 21 Feb. 2018.

3. Kuznetsov, S. E. "Poteri i koeffitsient poleznogo deistviya sudovogo sinkhronnogo generator." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2009): 67–71.

4. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Influence of load and power factor on marine synchronous generator efficiency." *Shipbuilding* 5 (2011): 29–32.

5. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Effect of load and power factor on fuel consumption of marine diesel generator set." *Shipbuilding* 6 (2011): 30–32.

6. Kuznetsov, S.E., and A.A. Vinogradov. "Udel'nyi raskhod topliva sudovogo dizel'-generatora." *Tezisy dokladov v MNK «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' mor-skoi industrii», 21-27 maya 2017.* Kaliningrad: KGTU, 2017. 141–143.

7. Vinogradov, A.A., and S.E. Kuznetsov. "Raspredelenie nagruzki pri parallel'noi rabote sudovykh dizel'-

generatornykh agregatov s uchetom raskhoda topliva." *Sbornik tezisov dokladov natsional'noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 21–22.

8. Kuznetsov, S., O. Bashkirev, and A. Vinogradov. "Specific fuel consumption and ship diesel generator losses." Transport business of Russia 5 (2017): 176–179.

9. Vinogradov, Andrey A. "A study of load distribution of marine diesel-generator sets in parallel operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

10. Rao, K. Srinivasa, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, and A. K. Gupta. "Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption." *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2015. 004726–004731. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392838.

11. Chauhan, Priyesh J., K. S. Rao, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, and A. K. Gupta. "Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture." *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015 IEEE PES Asia-Pacific*. IEEE, 2015. 1–6. DOI: 10.1109/APPEEC.2015.7380963.

12. Rao, Singiresu S., and Singiresu S. Rao. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2009. DOI:10.1002/9780470549124.

13. Wu, Wei, D. Wang, A. Arapostathis, and K. Davey. "Optimal power generation scheduling of a shipboard power system." *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS'07. IEEE*. IEEE, 2007. 519–522. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372135.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Виноградов Андрей Александрович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *Eric_esseker@mail.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vinogradov, Andrey A. —
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *Eric_esseker@mail.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PULSE WIDTH MODULATION METHODS

I. V. Belousov, V. F. Samosejko, L. M. Brovtsinova

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

Methods of sinusoidal and space vector pulse-width modulation are considered. The method of space vector pulse-width modulation is described in a form that allows comparing it with the method of sinusoidal pulse-width modulation. The formalization of the description of the sinusoidal pulse-width modulation method is presented and its shortcomings are shown. It is shown that the modified method of sinusoidal pulse-width modulation eliminates the shortcomings of the sinusoidal pulse-width modulation method by introducing a pre-modulation function. The obtained expression of the pre-modulation function excludes the emergence of the voltage overmodulation on a three-phase load, when the amplitude coefficient of the modulating function of the voltage varies from zero to unity. When describing the methods of pulse-width modulation, expressions are obtained for the commutation functions of half-bridges of a three-phase bridge, which have a simple form and allow a simple software implementation of it.

It is shown that the method of space vector pulse-width modulation, which is considered the best in the literature, is essentially identical to the modified method of sinusoidal pulse-width modulation. The difficulties of the process of comparing the methods of space vector and sinusoidal pulse-width modulation are explained by the use of various mathematical apparatus of their description, an attempt to overcome them has been undertaken in this paper.

Diversity of pre-modulation functions defines the set of possible methods for implementation pulse-width modulation. The pre-modulation function is a free variable that allows optimization of methods in pulse-width modulation. The parameters, characterizing the position of the pulses in the pulse-width modulation interval, are also free variables. The presence of free variables allows us to formulate and to solve the problem of optimal pulse-width modulation, which ultimately will reduce energy losses in propulsion motors and their vibration.

Keywords: pulse width modulation, sinusoidal PWM, space vector PWM, overmodulation, premodulation function; modulation quality, inverter.

For citation:
Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. "Comparative analysis of the pulse width modulation methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

УДК:621.341.572

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова

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

Рассмотрены методы классической и векторной широтно-импульсной модуляции. Метод векторной широтно-импульсной модуляции изложен в виде, позволяющем сравнивать его с методом классической широтно-импульсной модуляции. Представлена формализация описания метода классической широтно-импульсной модуляции и показаны его недостатки. Показано, что модифицированный метод классической широтно-импульсной модуляции устраняет недостатки классического метода путем введения функции предмодуляции. Полученное выражение функции предмодуляции исключает появление режима перемодуляции напряжения на трехфазной нагрузке при изменении коэффициента амплитуды модулирующей функции напряжения в диапазоне от нуля до единицы. При описании методов широтно-импульсной модуляции получены выражения для коммутационных функций полумостов трехфазного электронно-ключевого моста, которые имеют достаточно простой вид и позволяют выполнять достаточно простую его программную реализацию.

Показано, что метод векторной широтно-импульсной модуляции, считающийся в литературе наилучшим, является, по сути, тождественным модифицированному методу классической широтно-импульсной модуляции. Трудности процесса сравнения методов векторной и классической широтно-импульсной модуляции объясняются применением различного математического аппарата их описания, попытка преодоления которых предпринята в данной работе.

Многообразие функций предмодуляции определяет множество возможных методов реализации широтно-импульсной модуляции. Функция предмодуляции является свободной переменной, позволяющей выполнять оптимизацию методов при широтно-импульсной модуляции. Параметры, характеризующие положение импульсов на интервале широтно-импульсной модуляции, также являются свободными переменными. Наличие свободных переменных позволяет сформулировать и решить задачу оптимальной широтно-импульсной модуляции, что, в конечном итоге, позволит уменьшить потери энергии в гребных электродвигателях и их вибрацию.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, классический метод, векторный метод, перемодуляция, функция предмодуляции, качество модуляции.

Для цитирования:
Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

Введение (Introduction)

Управление потоками электрической энергии с развитием силовой электроники посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) нашло широкое применение в различных областях техники и, в частности, используется для управления гребными электродвигателями. Качество ШИМ существенно зависит от частоты следования импульсов. Однако увеличение частоты модуляции ведет к возрастанию динамических потерь в электронных ключах. Большие частоты модуляции применяются в электрических преобразователях меньшей мощности. Мощности преобразователей электрической энергии, реализуемых на полностью управляемых электронных ключах, неуклонно растут. Так, мощность единичных преобразователей частоты, используемых в системах электродвижения судов, в настоящее время достигает 5 МВт и более. Повышение качества модуляции напряжения на нагрузке ведет к снижению потерь мощности и уменьшению виброшумовых характеристик электроприводов, поэтому повышение качества модуляции является актуальной задачей.

Проблеме качества ШИМ с момента начала ее использования в силовой преобразовательной технике уделялось большое внимание. Наибольшее распространение получили два метода: метод классической ШИМ и метод векторной ШИМ. Метод классической ШИМ основан на сравнении желаемой функции напряжения (модулирующей функции) с периодической пилообразной функцией [1]. Классический метод был усовершенствован путем введения *функции предмодуляции*. Усовершенствованный метод классической ШИМ позволил поднять коэффициент использования напряжения источника питании [2]. Другим подходом к формированию модулированного напряжения является метод векторной ШИМ [3]. Существуют различные модификации этих методов [4] – [6]. Метод векторный ШИМ нашел широкое применение в силовой преобразовательной технике [4], [7] – [9].

Сравнению методов векторной и классической ШИМ посвящено большое количество работ [10] – [14], основанных на компьютерном моделировании. Ввиду импульсного характера функций, моделирование требует существенных затрат машинного времени. Для их моделирования предложены специальные спектральные критерии сравнения [14]. В литературе преобладает мнение о том, что метод векторной ШИМ лучше модифицированного классического метода, использующего функцию предмодуляции [8], [11] – [13]. Получить окончательный вывод о том, какой метод лучше, путем компьютерного моделирования невозможно. В работе [6] отмечается, что алгоритм переключения, который обычно называют *векторной ШИМ*, может быть получен при применении систем управления, основанных на иных принципах [15] – [17], причем пока нет доказательства, что векторный принцип построения микропроцессорной системы управления является наилуч-

шим. В данной статье показано, что векторной ШИМ (SVPWM) полностью идентичен методу классической ШИМ с определенной функцией предмодуляции. Многообразие возможных методов ШИМ полностью исчерпывается различными видами функций предмодуляции.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наибольшее практическое применение находит трехфазный электронно-ключевой мост, состоящий из трех верхних VH_A, VH_B, VH_C и трех нижних VL_A, VL_B, VL_C ключей. Общий потенциал нижних ключей и источника питания принимается равным нулю. Полагается, что включен либо верхний, либо нижний ключ полумоста. Общий потенциал верхних ключей и источника питания принимается равным напряжению источника питания U_d. Трехфазная нагрузка представляет собой *LR*-фильтр низкой частоты.

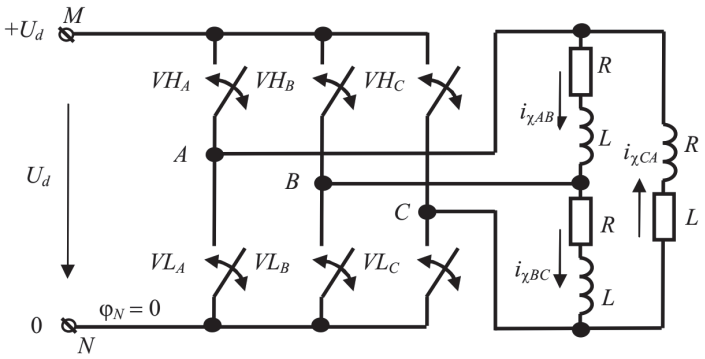


Рис. 1. Мостовая схема трехфазной модуляции

Под ШИМ в данной работе понимается процесс аппроксимации импульсами напряжения желаемого гладкого напряжения, необходимого для управления электродвигателями. Импульсная функция периодическая булева функция, принимающая значения «0» или «1».

Модулированная функция — импульсная функция, получаемая в процессе модуляции. *Модулирующая функция* — гладкая непрерывная функция, к которой должна быть приближена импульсная функция в процессе модуляции. Под *модулированной функцией* напряжения понимается отношение модулированного напряжения к напряжению источника питания U_d. Под *модулирующей функцией* напряжения понимается отношение модулирующего напряжения к напряжению источника питания U_d.

Коммутационная функция — это импульсная функция, единица которой соответствует включенному состоянию ключа, ноль — выключенному. Под потенциалом полумоста $X = A, B, C$ понимается потенциал его средней точки. Отношение потенциалов мостов к напряжению источника питания — это модулированная функция напряжения. Модулирующие фазные функции напряжения на нагрузке задаются вектором $\mathbf{g}_S = [g_A, g_B, g_C]^T$. Модулирующие функции потенциалов полумостов задаются вектором $\boldsymbol{\gamma}_S = [\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C]^T$. Вводится понятие *нулевой потенциальной функции*: $\gamma_0 = (\gamma_A + \gamma_B + \gamma_C)/3$. Произведение $\gamma_0 U_d$ — потенциал нулевой точки нагрузки, соединенной в звезду. Модулирующие фазные функции напряжения связаны с модулирующими функциями потенциалов полумостов очевидным соотношением: $\mathbf{g}_S = \gamma_S - \gamma_0 \cdot \mathbf{1}$, где $\mathbf{1}$ — единичный вектор.

Метод векторной ШИМ. Алгоритм векторной ШИМ предложен для управления трехфазным электронно-ключевым мостом, состоящим из полумостов *A*, *B*, *C* [3]. Для того чтобы показать, что метод векторной ШИМ идентичен методу классической ШИМ с функцией предмодуляции, необходимо видоизменить описание метода векторной ШИМ [3]. Состояния ключей полумостов будем обозначать булевым вектором $\mathbf{S} = [\chi_A, \chi_B, \chi_C]$, где χ_A, χ_B, χ_C — булевы переменные, принимающие значения «0» или «1». Переменные χ_A, χ_B, $\chi_C = 1$, если включен верхний ключ полумоста *A*, *B*, *C*. Переменные χ_A, χ_B, $\chi_C = 0$, если включен нижний ключ полумоста *A*, *B*, *C*. Так, $S_1 = [1,0,0]$ означа-

ет, что включен верхний ключ полумоста *A* и включены нижние ключи полумостов *B*, *C*. В трехфазном мосте можно выделить восемь состояний:

$\mathbf{S}_1 = [1,0,0]$; $\mathbf{S}_2 = [1,1,0]$; $\mathbf{S}_3 = [0,1,0]$; $\mathbf{S}_4 = [0,1,1]$; $\mathbf{S}_5 = [0,0,1]$; $\mathbf{S}_6 = [1,0,1]$;
$\mathbf{S}_7 = [1,1,1]$; $\mathbf{S}_8 = [0,0,0]$.

Векторы $\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_6$ называются *базовыми*, а $\mathbf{S}_7$ и $\mathbf{S}_8$ — *нулевыми*. Нулевые векторы обеспечивают нулевое значение напряжения на трехфазной нагрузке.

Модулированное напряжение на нагрузке формируется за счет переходов из состояния в состояние. Состояния нумеруются $k = 1, \ldots, 8$. Наиболее распространенная последовательность переходов на интервале модуляции

$$\rightarrow \mathbf{S}_8 \rightarrow \mathbf{S}_k \rightarrow \mathbf{S}_{k+1} \rightarrow \mathbf{S}_7 \rightarrow \mathbf{S}_{k+1} \rightarrow \mathbf{S}_k \rightarrow \mathbf{S}_8 \rightarrow$$

или

$$\rightarrow \mathbf{S}_7 \rightarrow \mathbf{S}_k \rightarrow \mathbf{S}_{k+1} \rightarrow \mathbf{S}_8 \rightarrow \mathbf{S}_{k+1} \rightarrow \mathbf{S}_k \rightarrow \mathbf{S}_7 \rightarrow,$$

где $k = 1, 2, \ldots, 6$ — номера базовых состояний.

Нулевые состояния $\mathbf{S}_7$ и $\mathbf{S}_8$ соответствуют номерам $k = 7$ и $k = 8$. Заметим, что в течение периода модуляции происходит по одной коммутации каждого полумоста. Будем обозначать относительное время пребывания электронно-ключевого моста в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0 = \mathbf{S}_7$ или $\mathbf{S}_8$, соответственно, τ_1, τ_2, τ_3. За базовое значение времени принят период модуляции.

Распределение времени пребывания электронно-ключевой цепи в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0$ на интервале ШИМ может быть различным. Однако наиболее часто распределение импульсов на интервале ШИМ центрально симметричное. Распределение времени пребывания электронно-ключевой цепи в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0$ при центрально симметричном расположении импульсов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение времени пребывания электронно-ключевой цепи в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0$

$\mathbf{S}_8$	$\mathbf{S}_k$	$\mathbf{S}_{k+1}$	$\mathbf{S}_7$	$\mathbf{S}_{k+1}$	$\mathbf{S}_k$	$\mathbf{S}_8$
$\tau_3/4$	$\tau_1/2$	$\tau_2/2$	$\tau_3/2$	$\tau_2/2$	$\tau_1/2$	$\tau_3/4$

Для определения значений τ_1, τ_2, τ_3 выполним преобразование вектора состояния $\mathbf{S}_k$ в новый вектор на комплексной плоскости:

$$\mathbf{V}_k = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{S}_k^{\,T}, \tag{1}$$

где $\mathbf{e} = [1, \exp(-j\cdot\rho), \exp(j\cdot\rho)]$; $j = \sqrt{-1}$; $\rho = 2\pi/3$; $k = 1, \ldots, 8$.

Базовые векторы на комплексной плоскости

$$\mathbf{V}_k = \exp\left(j \cdot (\varphi_k)\right), \tag{2}$$

где $k = 1, 2, \ldots, 6$; $\varphi_k = (k-1)\cdot\rho/2$ — аргумент базового вектора $\mathbf{V}_k$.

Относительным фазным напряжениям на нагрузке $\mathbf{g}_S$ ставится в соответствие вектор на комплексной плоскости:

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{e} \cdot \mathbf{g}_S^{\,T} = V_S \cdot \exp(j \cdot \varphi_S), \tag{3}$$

где φ_S — аргумент вектора $\mathbf{V}_S$.

Номер состояния k вычисляется из уравнения

$$1 = 1(\varphi_S - \varphi_k) \cdot 1(\varphi_k - \varphi_S),$$

где $1(x)$ — единичная функция.

Иллюстрация положений базовых векторов состояний трехфазного моста и вектора фазных напряжений на комплексной плоскости приведена на рис. 2.

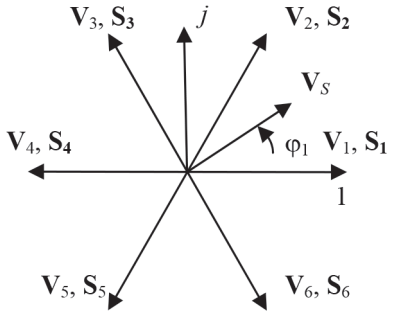


Рис. 2. Векторы базовых состояний трехфазного моста

Относительное время пребывания электронно-ключевого моста в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$ находится из уравнения

$$\mathbf{V}_S = \tau_1 \cdot \mathbf{V}_k + \tau_2 \cdot \mathbf{V}_{k+1}. \quad (4)$$

Длительность пребывания электронно-ключевого моста в нулевых состояниях $\mathbf{S}_0$ вычисляется по формуле $\tau_3 = 1 - \tau_1 - \tau_2$.

Каждому из сочетаний базовых векторов состояний $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$ соответствует совокупность неравенств модулирующих функций напряжений: $g_A > g_B > g_C$; $g_B > g_A > g_C$; $g_B > g_C > g_A$; $g_C > g_B > g_A$; $g_C > g_A > g_B$; $g_A > g_C > g_B$. Соответствие данных неравенств и сочетаний векторов состояний $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, а также результаты решения уравнения (4) для различных номеров состояний моста k сведены в табл. 2. Учитывая распределение времени пребывания электронно-ключевой цепи в состояниях $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0$, можно составить таблицу, которая будет определять коэффициенты заполнения интервала ШИМ полумостов для каждого из состояний.

Коэффициенты заполнения интервала ШИМ полумостов являются модулирующими функциями потенциалов полумостов γ_A, γ_B, γ_C. Соответствие модулирующих функций потенциалов полумостов и относительной длительности пребывания электронно-ключевого моста τ_1, τ_2, τ_3 в состояниях с номерами k приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительные длительности τ_1, τ_2, τ_3 и модулирующие функции потенциалов полумостов

Состояние		τ_1	τ_2	τ_3	γ_A	γ_B	γ_C	γ_0
$\mathbf{S}_1$, $\mathbf{S}_2$	$g_A > g_B > g_C$	g_{AB}	g_{BC}	$1+g_{CA}$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_3/2$	$(1+g_B)/2$
$\mathbf{S}_2$, $\mathbf{S}_3$	$g_B > g_A > g_C$	$-g_{CA}$	$-g_{AB}$	$1-g_{BC}$	$\tau_1+\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_3/2$	$(1-g_A)/2$
$\mathbf{S}_3$, $\mathbf{S}_4$	$g_B > g_C > g_A$	g_{BC}	g_{CA}	$1+g_{AB}$	$\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_2+\tau_3/2$	$(1+g_C)/2$
$\mathbf{S}_4$, $\mathbf{S}_5$	$g_C > g_B > g_A$	$-g_{AB}$	$-g_{BC}$	$1-g_{BC}$	$\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$(1-g_B)/2$
$\mathbf{S}_5$, $\mathbf{S}_6$	$g_C > g_A > g_B$	g_{CA}	g_{AB}	$1+g_{BC}$	$\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$(1+g_A)/2$
$\mathbf{S}_6$, $\mathbf{S}_1$	$g_A > g_C > g_B$	$-g_{BC}$	$-g_{CA}$	$1-g_{AB}$	$\tau_1+\tau_2+\tau_3/2$	$\tau_3/2$	$\tau_1+\tau_3/2$	$(1-g_C)/2$

Табл. 1 и 2 определяют модулирующие функции и состояния полумостов на каждом временном интервале модуляции. Таким образом, модулирующим функциям потенциалов полумостов в каждый момент времени поставлены в соответствие их дискретные состояния $\mathbf{S}_k$, $\mathbf{S}_{k+1}$, $\mathbf{S}_0$.

Метод классической ШИМ. Метод классической ШИМ основан на сравнении модулирующей функции с периодической пилообразной функцией. Коммутирующие функции χ_X полумостов $X = A, B, C$, согласно классическому методу модуляции, запишутся в следующем виде:

$$\chi_X = 1\left(\gamma_X - \varphi(\tau)\right), \quad (5)$$

где τ — относительное время; γ_X — модулирующие функции полумостов $X = A, B, C$.

Так как векторная ШИМ использует центрально-симметричное положение импульсов на интервале ШИМ, для модуляции классическим методом целесообразно использовать симметричную однополярную пилообразную функцию, которую можно записать в следующем виде:

$$\varphi(\tau) = \mathrm{abs}\left(2 \cdot \left(\tau - \mathrm{floor}(\tau)\right) - 1\right), \tag{6}$$

где abs(x) — модуль числа x; floor(τ) — целая часть числа τ.

Модулирующие функции полумостов определяются выражением

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X - \psi_0, \tag{7}$$

где ψ_0 — функция предмодуляции.

Если принять, что функция предмодуляции $\psi_0 = 0$ и нулевая потенциальная функция моста $\gamma_0 = 1/2$, то модулирующие функции полумостов

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X. \tag{8}$$

Значению функции предмодуляции $\psi_0 = 0$ соответствует метод классический ШИМ.

Результаты анализа метода классической ШИМ. Поскольку наиболее востребованными являются алгоритмы с синусоидальными модулирующими функциями напряжений, то примем

$$g_X = \frac{a}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{2\pi\tau}{f^*} - (X-1)\frac{2\pi}{3}\right), \tag{9}$$

где $X = 1, 2, 3$; f^* — относительная частота модуляции; a — коэффициент амплитуды напряжения; f^* — большая величина, обычно принимающая значения 10 – 200.

Если в выражение (8) подставить вместо g_X амплитуду функции (9) и положить $\gamma_X = 1$, то из полученного равенства можно найти максимальный коэффициент амплитуды $a = \sqrt{3}/2 = 0{,}866$, при котором отсутствует перемодуляция. Из неравенства $a < 0{,}866$ следует, что центрально-симметричная синусоидальная ШИМ не полностью использует величину модулируемого напряжения моста U_d. При $a > 0{,}866$ возникает режим перемодуляции, который приводит к возникновению низкочастотных гармоник и существенному ухудшению качества напряжения. Таким образом, в методе классической синусоидальной ШИМ напряжение источника питания используется не полностью.

Модифицированный метод классической ШИМ предполагает $\psi_0 \neq 0$. Множество функций предмодуляции ψ_0 определяет множество методов ШИМ. Можно подобрать такую функцию предмодуляции ψ_0, которая устранит недостаток классического метода ШИМ, сделав его идентичным методу векторной ШИМ. Введем ограничения на модулирующие функции полумостов:

$$0 \le \gamma_X \le 1. \tag{10}$$

Выполнение данных неравенств позволяет избежать перемодуляции. Упорядочим модулирующие функции полумостов на интервале ШИМ:

$$0 \le \gamma_{X(A)} \le \gamma_{X(B)} \le \gamma_{X(C)} \le 1,$$

где $X(A)$, $X(B)$, $X(C)$ — новые имена полумостов $X = A, B, C$.

Учитывая, что модулирующие функции ключей полумостов $X = A, B, C$ определены выражением (7), модулирующие функции напряжений должны удовлетворять неравенствам:

$$-1/2 + \psi_0 \le g_{X(A)} \le g_{X(B)} \le g_{X(C)} \le 1/2 + \psi_0,$$

откуда следует, что

$$\psi_{\min} = -1/2 + g_{X(C)} \le \psi_0 \le 1/2 + g_{X(A)} = \psi_{\max}.$$

Функцию предмодуляции определим как среднее значение между $\psi_{\min}$ и $\psi_{\max}$:

$$\psi_0 = \frac{\psi_{\max} + \psi_{\min}}{2} = \frac{g_{X(A)} + g_{X(C)}}{2} = \frac{\min\{g_A, g_B, g_C\} + \max\{g_A, g_B, g_C\}}{2}. \quad (11)$$

Результаты анализа модифицированного метода классической ШИМ. Минимальное значение модулирующих функций полумостов

$$\gamma_{X(A)} = \frac{1}{2} + g_{X(A)} - \psi_0 = \frac{1 + g_{X(A)} - g_{X(C)}}{2}. \quad (12)$$

Заметим, что $g_{X(A)} - g_{X(C)}$ является модулирующей функцией полумостов и удовлетворяет неравенству $g_{X(A)} - g_{X(C)} \geq -1$. Тогда минимальное значение модулирующих функций полумостов (12) при использовании функции предмодуляции, определенной формулой (11), удовлетворяет неравенству $\gamma_{X(A)} \geq 0$. Это неравенство совпадает с одним из исходных неравенств (10), удовлетворение которых исключает возникновение режима перемодуляции.

Максимальное значение модулирующих функций полумостов

$$\gamma_{X(C)} = \frac{1}{2} + g_{X(C)} - \psi_0 = \frac{1 + g_{X(C)} - g_{X(A)}}{2}. \quad (13)$$

Заметим, что $g_{X(C)} - g_{X(A)}$ является модулирующей функцией полумостов и удовлетворяет неравенству $g_{X(C)} - g_{X(A)} \leq 1$. Тогда максимальное значение модулирующих функций полумостов (13) при функции предмодуляции, определенной формулой (11), удовлетворяет неравенству $\gamma_{X(C)} \leq 1$. Это неравенство совпадает с одним из исходных неравенств (10). Таким образом, функция предмодуляции (11) исключает возникновение режима перемодуляции.

Учитывая приведенные ранее выкладки, коммутационные функции ключей можно записать в следующем виде:

$$\chi_X = 1\left(g_X + \gamma_0 - \varphi(\tau)\right), \quad (14)$$

где $\gamma_0 = \frac{1 - \max_{X=A,B,C}\{g_X\} - \min_{X=A,B,C}\{g_X\}}{2}$ — нулевая потенциальная функция полумостов.

Графики модулирующих функций полумостов и нулевой потенциальной функции приведены на рис. 3.

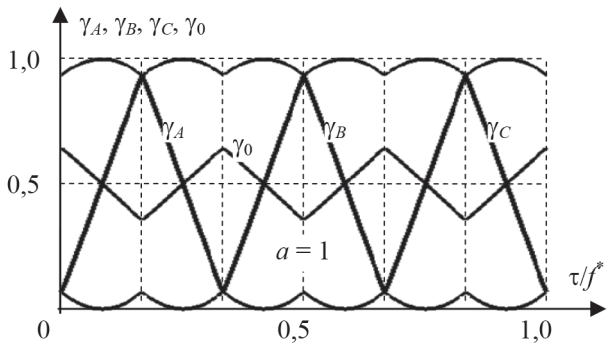


Рис. 3. Модулирующие функции полумостов и нулевой потенциальной функции

Обсуждение методов ШИМ. Метод классической ШИМ неполностью использует напряжение источника питания. Стремление увеличить коэффициент амплитуды напряжений *a* выше его граничного значения $a = 0{,}866$ ведет к появлению в составе модулированного напряжения гармоник низкой частоты и, как следствие, к существенному искажению формы порождаемого их тока.

Использование функции предмодуляции ψ_0 позволяет устранить основной его недостаток — неполное использование напряжения источника питания. Можно высказать гипотезу о том, что использование полученной нулевой потенциальной функции в формуле (14) ведет не только

к повышению граничного значения коэффициента амплитуды до единицы, но и к улучшению гармонического состава токов в нагрузке. Исследование гармонического состава токов является предметом дальнейших исследований.

Метод векторной ШИМ по отношению к методу классической ШИМ имеет существенно более сложное формальное описание. Используя табл. 2 и полученное выражение (14), можно заметить, что данная функция является обобщенной записью функций графы γ_0 табл. 2. Таким образом, метод векторной ШИМ, по сути, идентичен методу классической ШИМ. Если будет определен другой порядок модуляции в векторной ШИМ, то соответствующим подбором функции предмодуляции можно добиться их идентичности.

Заключение (Conclusion)

Исследование векторного и классического методов ШИМ показало, что оба метода дают один и тот же результат, несмотря на то, что излагаются в разных формальных терминах. Добиться идентичности методов векторной и классической ШИМ позволяет использование функции предмодуляции специального вида. Усовершенствованный метод классической ШИМ формализуется существенно проще векторного метода, что облегчает его программную реализацию. Подбирая вид пилообразной модулирующей функции и функции предмодуляции, можно реализовать всевозможное многообразие методов ШИМ. Такая трактовка методов ШИМ открывает возможности для аналитической оптимизации ШИМ по критерию качества тока в нагрузке. Применение преобразователей частоты с оптимальной ШИМ позволит уменьшить потери энергии в гребных электродвигателях и их вибрацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holtz J.* Pulsewidth modulation for electronic power conversion / J. Holtz // Proceedings of the IEEE. — 1994. — Vol. 82. — Is. 8. — Pp. 1194–1214. DOI: 10.1109/5.301684.

2. *Holmes D. G.* Pulse width modulation forpower converters: Principles and Practice/D. G. Holmes, T. A. Lipo. — John Wiley & Sons, 2003. — 734 p.

3. *Trzynadlowski A. M.* Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate / A. M. Trzynadlowski, R. L. Kirlin, S. F. Legowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.

4. *Шрейнер Р. Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 654 с.

5. *Демкин В. И.* Быстрый метод пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции / В. И. Демкин, А. А. Бодрова, В. И. Логвин, Б. И. Звягинцев // Молодой ученый. — 2015. — № 22 (102). — С. 137–141.

6. *Чаплыгин Е. Е.* Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения / Е. Е. Чаплыгин, С. В. Хухтиков // Электричество. — 2011. — № 5. — С. 53–61.

7. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. — Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. — 298 с.

8. *Калачев Ю. Н.* Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. — М.: ЭФО, 2013. — 63 с.

9. *Юдинцев А. Г.* Система управления трёхфазным автономным инвертором с векторной широтно-импульсной модуляцией / А. Г. Юдинцев, В. М. Рулевский // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 5-1. — С. 168–173.

10. *Чаплыгин Е. Е.* Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учебное пособие / Е. Е. Чаплыгин. — М.: МЭИ, 2009. — 56 с.

11. *Титяев Д. К.* Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции / Д. К. Титяев, Д. Н. Мирошник // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 11–14 травня 2004 р. — Донецьк: ДонНТУ, 2004. — С. 301–306.

12. *Виноградов А. Б.* Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем / А. Б. Виноградов, А. Н. Сибирцев, А. А. Коротков, Д. А. Монов // Тр. VII Междунар. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012). — Иваново: ИГЭУ, 2012. — С. 109–113.

13. *Andriyanov A. I.* A comparative characteristic of different kinds of pulse-width modulation with respect of the topologies of existence of periodic operating conditions / A. I. Andriyanov, G. Ya. Mikhal'chenko // Электричество. — 2004. — № 12. — С. 46–54.

14. *Обухов С. Г.* Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // Электричество. — 2008. — № 7. — С. 23а–31.

15. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники: учеб. пособие / С. Г. Зиновьев. — М.: Юрайт, 2012. — 667с.

16. *Чаплыгин Е. Е.*Способ управления автономным инвертором напряжения с векторной ШИМ / Е. Е. Чаплыгин, С. В. Хухтиков // Практическая силовая электроника. — 2010. — № 39. — С. 40–43.

17. *Чубуков К. А.* Исследование и разработка вариантов широтно-импульсной модуляции в трехфазных автономных инверторах с двигательной нагрузкой: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.12 / К. А. Чубуков. — Чебоксары, 2010. — 23 с.

REFERENCES

1. Holtz, Joachim. "Pulsewidth modulation for electronic power conversion." *Proceedings of the IEEE* 82.8 (1994): 1194-1214. DOI: 10.1109/5.301684.

2. Holmes, D. Grahame, and Thomas A. Lipo. *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. John Wiley & Sons, 2003.

3. Trzynadlowski, Andrzej M., R. Lynn Kirlin, and Stanislaw F. Legowski. "Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate [for VSI]." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.

4. Shreiner, R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty*. Ekaterinburg: URO RAN, 2000.

5. Demkin, V.I., A.A. Bodrova, V.I. Logvin, and B.I. Zvyagintsev. "Bystryi metod prostranstvenno-vektornoi shirotno-impul'snoi modulyatsii." *Molodoi uchenyi* 22(102) (2015): 137–141.

6. Chaplygin, E.E., and S.V. Khukhtikov. "Shirotno-impul'snaya modulyatsiya s passivnoi fazoi v trekhfaznykh invertorakh napryazheniya." *Elektrichestvo* 5 (2011): 53–61.

7. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka*. Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina», 2008.

8. Kalachev, Yu.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)*. M.: EFO, 2013.

9. Yudintsev, A.G., and V.M. Rulevskiy. "The vector pulse width modulation control system for three-phase voltage source inverter." *Fundamental research* 5-1 (2015): 168–173.

10. Chaplygin, E.E. *Spektral'noe modelirovanie preobrazovatelei s shirotno-impul'snoi modulyatsiei. Uchebnoe posobie*. M.: MEI, 2009.

11. Tityaev, D.K., and D.N. Miroshnik. "Sravnitel'nyi analiz vektornoi i traditsionnoi shirotno-impul'snoi modulyatsii." *Avtomatizatsiya tekhnologichnikh ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodikh. Zbirnik naukovikh prats' IV Mizhnarodnoï naukovo-tekhnichnoï konferentsiï aspirantiv ta studentiv v m. Donets'ku 11–14 travnya 2004 r.* Donets'k: DonNTU, 2004: 301–306.

12. Vinogradov, A.B., A. N. Sibirtsev, A. A. Korotkov, and D. A. Monov. "Sravnitel'nyi analiz energeticheskikh pokazatelei algoritmov upravleniya vysokovol'tnym mnogourovnevym preobrazovatelem." *Trudy VII Mezhdunar. (XVIII Vseros.) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2012)*. Ivanovo: IGEU, 2012: 109–113.

13. Andriyanov, A.I., and G.Ya. Mikhal'chenko. "A comparative characteristic of different kinds of pulse-width modulation with respect of the topologies of existence of periodic operating conditions." *Electrical Technology Russia* 12 (2004): 46–54.

14. Obukhov, S.G., E.E. Chaplygin, and D.E. Kondrat'ev. "Shirotno-impul'snaya modulyatsiya v trekhfaznykh invertorakh napryazheniya." *Elektrichestvo* 7 (2008): 23a–31.

15. Zinov'ev, G.S. *Osnovy silovoi elektroniki: Uchebnoe posobie*. M.: Yurait, 2012.

16. Chaplygin, Evgeniy, and Sergei Khukhtikov. "Control Method For Self-Commutated Voltage Inverter With Vector PWM." *Practical Power Electronics* 39 (2010): 40–43.

17. Chubukov, K.A. Issledovanie i razrabotka variantov shirotno-impul'snoi modulyatsii v trekhfaznykh avtonomnykh invertorakh s dvigatel'noi nagruzkoi. Abstract of PhD diss. Cheboksary, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белоусов Игорь Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru*

Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru, samoseyko@mail.ru*

Бровцинова Людмила Михайловна —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belousov, Igor V. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru*

Samosejko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru, samoseyko@mail.ru*

Brovtsinova, Ludmila M. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 г.
Received: March 14, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443

JOINT CONTROL BY OBJECT IN ERGATIC SYSTEM: MODELS AND REALIZATIONS

V. O. Tyrva

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

A control is seen as a process of organizing the impact on some part of the environment, which is called a management object. Asa result of the impact on the object, the needs of the subject who interacts with this object are satisfied. The subject (human operator) is in the control loop of the ergatic system object. It develops control actions and realizes them by means of controls which are in the human-machine interface. Automatic device (automatic machine) also produces control effects on the object in the implementation of joint management. A discrete model of human-operator actions is used. According to this model, the joint management of the object is organized. The control actions from the human operator and from the machine are formed with the help of the command apparatus control. A person can adjust the control actions of the machine or take full control of the object. The machine through the control informs the person-operator of their intentions and takes over the management, if the person-operator for any reason is removed from it. Traditional human-machine interface command devices are not suitable to implement such joint control capabilities. The principles of construction are considered and the visual models of new man-machine interface command devices for joint control are offered. Mathematical models of their action, combined with the mathematical model of the object, are constructed for such command devices. On this basis, a view of the managed object state change is obtained.This is a set of elementary movements that line up in a certain sequence in a single space of States. Differential equations are used to describe each elementary movement. The sequence of elementary movements is displayed in the state space as a continuous trajectory, and changing the state of the object is characterized by the movement of the depicting point along this path.The developed generalized model is convenient in application for rational distribution of control functions between the human operator and the automaton in the ergatic system. The model is convenient for the use of artificial intelligence software to build a sequence of elementary movements when changing the objectives and conditions of the system. Mathematical models of elementary movements represent an opportunity to execute calculations of optimum control on a computer at the organization of joint control of object. The article presents the results of full-scale experiments to control the movement of the vessel into the shipping lock. They confirmed the expediency of the combined control of the vessel movement in situations of increased danger when entering the vessel into the shipping lock.

Keywords: ergatic system, a human operator, the object of control, joint control, mathematical model, elementary movement.

For citation:
Tyrva, Vladimir O. "Joint control by object in ergatic system: models and realizations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.

УДК: 62-50

СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ В ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ: МОДЕЛИ И РЕАЛИЗАЦИИ

В. О. Тырва

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

Под «совместным управлением» в статье понимается процесс организации целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую объектом управления, в результате которого удовлетворяются потребности субъекта, взаимодействующего с этим объектом. Субъект, находящийся в контуре управления эргатической системы — человек-оператор вырабатывает управляющие воздействия на объект и реализует их с помощью органов управления человеко-машинного интерфейса. При совмест-

ном управлении объектом подобные воздействия на объект вырабатываются также автоматическим устройством — автоматом. На основе дискретной модели действий человека-оператора предлагается организовать совместное управление объектом так, чтобы управляющие воздействия, исходящие от человека-оператора и от автомата, суммировались с помощью органа управления командоаппарата человеко-машинного интерфейса. Человек может корректировать действия автомата или полностью взять на себя управление объектом, а автомат через орган управления командоаппарата информирует человека-оператора о своих намерениях и берет на себя управление объектом, если человек-оператор по какой-либо причине от него устраняется. Для реализации таких возможностей совместного управления традиционные командоаппараты человеко-машинного интерфейса не подходят. В связи с этим рассматриваются принципы построения и предлагаются изобразительные модели новых командоаппаратов человеко-машинного интерфейса. С учетом особенностей таких командоаппаратов построены математические модели их действия, совмещаемые с математической моделью объекта. На основе этих моделей получено математическое представление эволюции состояния объекта через множество элементарных движений, выстраиваемых в определенную последовательность в едином для них многомерном пространстве состояний. Каждое элементарное движение описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Последовательность элементарных движений отображается в пространстве состояний в виде непрерывной траектории, а изменение состояния объекта характеризуется движением изображающей точки по этой траектории. Разработанная обобщенная модель удобна для рационального распределения функций управления между человеком-оператором и автоматом в эргатической системе, а также для использования программных средств искусственного интеллекта при построении последовательности элементарных движений, когда изменяются цели и условия функционирования системы. Математические модели элементарных движений представляют возможность выполнения расчетов оптимального управления на ЭВМ. В статье приведены результаты натурных экспериментов, подтверждающих возможность и целесообразность применения совместного управления движением судна в ситуациях повышенной опасности при вводе судна в шлюз.

Ключевые слова: эргатическая система, человек-оператор, объект управления, совместное управление, математическая модель, элементарное движение.

Для цитирования:
Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.

Введение (Introduction)

В широком смысле управление как процесс представляет собой организацию целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую *объектом управления*, в результате которого удовлетворяются потребности субъекта, взаимодействующего с этим объектом. При автоматизированном управлении техническим объектом субъект — человек-оператор (ЧО) — находится в контуре управления и взаимодействует с объектом управления с помощью человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) — технических и программных средств, обеспечивающих возможность ЧО управлять этим объектом и контролировать его работу (ГОСТ Р МЭК 60447-2000).

Согласно терминологии, принятой в 1960 г. на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению, автоматизированная система с ЧО в контуре управления представляет собой *эргатическую систему управления* (ЭСУ), которую называют также *человеко-машинной системой*, если объектом управления является некоторый технический объект. Особенности управления объектом в ЭСУ состоят в том, что психофизические свойства ЧО должны быть учтены в параметрах (свойствах) системы управления. В этой связи при проектировании ЭСУ учитываются и используются рекомендации по распределению функций управления между ЧО и техническими средствами управления объектом, выработанные в научном направлении «Инженерная психология» — отрасли психологии, исследующей процессы и средства информационного взаимодействия между человеком и машиной, а также техническими средствами автоматизации. Наиболее существенные результаты в изучении и создании ЭСУ получены в авиации. Учеными и практиками обоснована и подтверждена эффективность совместного управления полетом самолета, когда управляющие воздействия на исполнительные механизмы самолета вырабатываются совместно и пилотом, и автоматической системой [1].

На водном транспорте актуальной проблемой автоматизации ЭСУ является обеспечение с помощью технических средств рационального распределения функций управления между техническими средствами управления (автоматом ЭСУ) и ЧО с возможностью взаимной коррекции управляющих действий, вырабатываемых автоматом ЭСУ и создаваемых ЧО как в нормальных условиях эксплуатации объекта, так и при возникновении аварийных ситуаций. Рациональному распределению функций управления способствует реализация совместного управления объектом по принципу HOTAS (HandsOnThrottle-And-Stick — руки на секторе газа и ручке управления [1]) с помощью единых для ЧО и автомата ЭСУ командоаппаратов [2], [3]. Для реализации такого совместного взаимодействия ЧО и автомата ЭСУ, в дополнение к проведенным исследованиям, требуется решить задачи разработки новых типов командоаппаратов ЧМИ, приспособленных для совместного человеко-машинного управления объектом, а также моделей управляемого изменения во времени состояний объекта ЭСУ под действием совмещенного управления.

Предлагаемый подход к решению выделенных задач основан на представлениях и методах теорий ЭСУ, включая инженерную психологию, и автоматического управления, включая теорию оптимального управления. Чтобы совместить управляющие действия ЧО и автомата ЭСУ в математической модели ЭСУ, используется дискретная модель действий ЧО, разработанная в инженерной психологии [4], и модель объекта с сосредоточенными параметрами в форме нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Математическая модель ЭСУ определяется в классе систем с переменной структурой в едином для всех структур пространстве состояний. Математическая модель технической части ЭСУ как бы приближается к ЧО с учетом особенностей реализации ЧМИ. Модель представляется в форме, удобной для построения последовательности управляющих воздействий на объект, с применением элементов искусственного интеллекта (базы знаний, экспертной системы и системы логического вывода) и использованием вычислительных средств для оптимизации управления при заданных целях и ограничениях параметров состояния технического объекта. В основу моделирования ЭСУ положены представления о взаимосвязи действий и ответных реакций ЧО и машины [4], о неполных кусочных описаниях конструируемого движения объекта для последовательности ситуаций [5], ситуационном управлении [6], рациональном агенте [7] и искусственном интеллекте [8].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Особенности совместного управления техническим объектом. Исследованиями [4] установлено, что деятельность ЧО в контуре управления системы представляется алгоритмом, выраженным как «*всё или ничего*». Входной сигнал либо передается в нервную систему, либо не передается. Центральная нервная система получает сигналы-раздражители и посредством обратной связи производит сличение этих сигналов, сохраняющихся в кратковременной (оперативной) памяти. Минимальное время, затрачиваемое на это сравнение (по данным источника [4]), равно примерно 0,3 с. Затем вырабатывается решение об управляющем воздействии и производится воздействие на орган управления объектом. Это происходит в течение примерно 0,2 с или более, причем внимание ЧО полностью обращено на контроль действия исполнительного органа и никаких новых раздражителей центральная нервная система не принимает. После этого центральная нервная система снова переключается на получение новых раздражений. Интервалом не менее чем 0,3 + 0,2 = 0,5 с завершается один из повторяющихся циклов получения информации, переработки ее и ответной реакции ЧО. Это оптимистическая оценка. В действительности время реакции человека больше, оно зависит от возраста и от пола. Время решения мыслительных и логических задач зависит от квалификации и индивидуальных особенностей ЧО, а также от количества решаемых задач, количества возможных вариантов решения, количества органов управления и т. д. [9]. Диаграмма взаимосвязи действий и ответных реакций в системе «человек – машина» приведена на рис. 1.

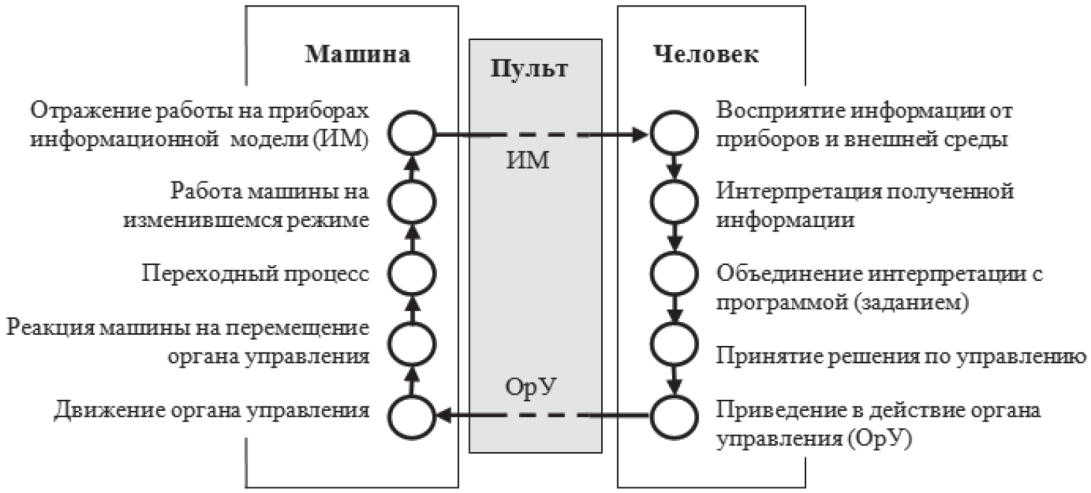


Рис. 1. Диаграмма взаимосвязи действий и ответных реакций ЧО и машины:
ИМ — информационная модель; *ОрУ* — орган управления

Установлено, что в промежутках между интервалами контроля параметров движения и приложения управляющего воздействия человеком система управления объектом остается как бы разомкнутой (по контуру управления, в котором находится ЧО). Принятие человеком решения на цикле управления выражается в реализации одной из возможностей: либо воздействовать на орган управления, либо не воздействовать, т. е. «оставить так, как есть».

Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 60447-2000 устанавливает общие требования к приводимым в действие вручную органам управления электрическим оборудованием, машинами или технологическими процессами, составляющими ЧМИ. Орган управления — это часть электрооборудования ЭСУ, которая принимает воздействие человека (от руки, ноги или другой части тела). Орган управления может быть технически реализован в виде ручки, штурвала, педали, кнопки, «мыши», светового пера, клавиатуры, чувствительной области экрана монитора или другим образом. Согласно требованиям ГОСТа Р МЭК 60447-2000, орган управления должен выполнять только команды, соответствующие заданным целям его применения.

Моделирование управляющих действий человека-оператора. Для командоаппарата ЧМИ описание целенаправленных перемещений органа управления (ОрУ), положение которого характеризуется координатой u, представляется следующими моделями:

– модель двухпозиционного органа управления (модель 2П):

$$\left.\begin{array}{l} u = u_0 - \text{включено}; \\ u = 0 - \text{выключено}; \end{array}\right\} \quad (1)$$

– модель трехпозиционного органа управления (модель 3П):

$$\left.\begin{array}{l} u = u_{\text{в}} - \text{ включено "Вверх" ("Вперед", "Влево", ...)}; \\ u = 0 - \text{ отлючено}; \\ u = -u_{\text{н}} - \text{ включено "Вниз" ("Назад", "Вправо", ...)}; \end{array}\right\} \quad (2)$$

– модель многопозиционного органа управления (модель МП):

$$\dot{u} = \omega; \quad (3)$$

$$\left.\begin{array}{l} \omega = \omega_{\text{в}} - \text{изменить "Вверх" ("От себя", "Влево", ...) положение ОрУ}; \\ \omega = 0 - \text{ оставить неизменным положение ОрУ}; \\ \omega = -\omega_{\text{н}} - \text{изменить "Вниз" ("К себе", "Вправо", ...) положение ОрУ}; \end{array}\right\} \quad (4)$$

– модель многопозиционного многоскоростного органа управления (модель МПС):

$$\left.\begin{aligned}\dot{u} &= \omega;\\ \dot{\omega} &= \varepsilon;\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

$$\left.\begin{aligned}&\varepsilon = \varepsilon_{в} - \text{ изменить "Вверх" скорость перемещения ОрУ;}\\ &\varepsilon = 0 - \text{ оставить неизменной скорость перемещения ОрУ;}\\ &\varepsilon = -\varepsilon_{н} - \text{ изменить "Вниз" скорость перемещения ОрУ;}\end{aligned}\right\}. \qquad (6)$$

Здесь и далее точкой над буквой обозначается операция дифференцирования по времени t. Параметрам u_0, $u_в$, $u_н$, $\omega_в$, $\omega_н$, $\varepsilon_в$, $\varepsilon_н$ придаются некоторые числовые положительные значения. Пример временной диаграммы скорости перемещения органа управления по модели МПС приведен на рис. 2.

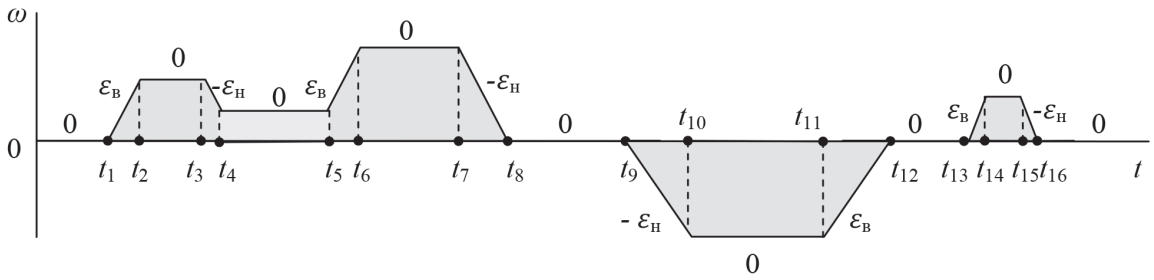


Рис. 2. Пример временной диаграммы скорости перемещения органа управления командоаппарата

График зависимости скорости ω от времени t представлен как результат интегрирования второго уравнения системы дифференциальных уравнений (5) на интервале времени $t < t_1$ при $\varepsilon = 0$, на интервале времени $t_1 < t < t_2$ при $\varepsilon = \varepsilon_в$ и стыковки решений в момент t_1, затем интегрирования на интервале времени $t_2 < t < t_3$ при $\varepsilon = 0$ и стыковки решений в момент t_2, затем интегрирования при значениях ε, равных $-\varepsilon_н$, затем 0, затем $\varepsilon_в$ и так далее, со стыковкой решений в моменты времени t_3, t_4, t_5, ... Точки графика для моментов времени t_1, t_2, t_3, ... являются угловыми точками непрерывной линии, которая изображает проекцию траектории движения органа управления командоаппарата в пространстве $M^3 = \{t \times u \times \omega\}$ на плоскость $M^2 = \{t \times \omega\}$.

Командоаппараты совместного управления объектом. На рис. 3 показаны изобразительные модели командоаппаратов совместного управления объектом ЭСУ, иллюстрирующие особенности их построения.

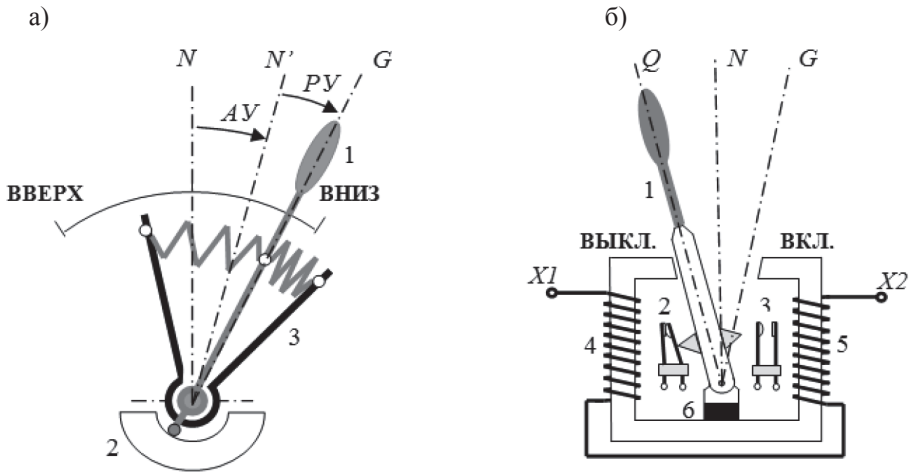


Рис. 3. Изобразительные модели аппаратов совместного управления техническим объектом:
а — аппарат с многопозиционным органом управления;
б — аппарат с двух- или трехпозиционным органом управления

По рис. 3, *а* можно представить принцип построения командоаппарата с многопозиционным органом управления на основе аналогового датчика углового перемещения *2*. Сигнал на выходе датчика однозначно определяется положением рукоятки ручного управления *1* (положение *G*). Рукоятка управления *1* с помощью пружин связана с угловой поворотной вилкой *3*, отклоняемой от нейтрального положения *N* до положения *N*′ серводвигателем автомата ЭСУ (угол АУ) при управлении объектом ЭСУ. Результирующее положение рукоятки равно алгебраической сумме углов ее отклонения (*АУ* + *РУ*), созданных автоматом (положение *N*′) и рукой ЧО (до положения *G*). Когда ЧО держит рукой орган управления, то через перемещение рукоятки и возникших усилий, из-за упругости пружин, ЧО получает информацию о «намерениях» автомата ЭСУ изменить текущее состояние ЭСУ (реализация принципа HOTAS). При этом ЧО за счет перемещения органа управления (угол *РУ*) может корректировать управляющие действия автомата ЭСУ, если он «не соглашается» с автоматом. Если ЧО не создает корректирующие воздействия на орган управления (*РУ* = 0), то управление объектом ЭСУ полностью осуществляется автоматом ЭСУ. Приоритет в управлении объектом имеет ЧО. При отключении или отказе автоматики управление объектом ЭСУ не прерывается, так как его продолжает ЧО с помощью воздействия на орган управления командоаппарата.

На рис. 3, *б* показана изобразительная модель командоаппарата совместного управления с двухпозиционным органом управления на основе поляризованного электромагнитного механизма с постоянным магнитом. На трехконтурном магнитопроводе размещена катушка с двухсекционной обмоткой *4–5*, на которую автоматом ЭСУ подается импульс электрического напряжения определенной полярности при включении (поворот рукоятки *1* из положения *Q* в положение *G*) или импульс напряжения противоположной полярности при выключении (поворот рукоятки *1* из положения *G* в положение *Q*). В положении *Q* контакт *2* замкнут, а контакт *3* разомкнут. В положении *G* замкнут контакт *3* и разомкнут контакт *2*. С помощью контактов коммутируются электрические цепи управления объектом ЭСУ. При отсутствии напряжения на зажимах *X*1, *X*2 орган управления командоаппарата сохраняет принятое положение либо *Q*, либо *G* благодаря созданной постоянным магнитом *6* силе, действующей на орган управления. ЧО может мускульным усилием изменить положение органа управления, повернув рукоятку, или воспрепятствовать повороту рукоятки, если от автомата ЭСУ поступает импульс управления на обмотку *4–5*. Тем самым обеспечивается возможность коррекции автоматического управления объектом ЭСУ действиями ЧО. Приоритет в управлении объектом этим командоаппаратом также имеет ЧО.

Командоаппарат совместного управления объектом ЭСУ с трехпозиционным органом управления командоаппарата можно получить на базе поляризованного электромагнитного механизма, введя в конструкцию командоаппарата, показанного на рис. 3, *б*, возвратную пружину, перемещающую рукоятку *1* в нейтральное положение *N* при отсутствии электрического напряжения на обмотке *4–5* катушки механизма, если ЧО не создает мускульное усилие, препятствующее перемещению рукоятки. При такой конструкции командоаппарата совместного управления объектом ЭСУ рукоятка *1* должна удерживаться в любом из положений *Q* или *G* благодаря электрическому напряжению соответствующей полярности, приложенному к обмотке катушки или / и мускульному усилию ЧО.

Рассмотренные командоаппараты совместного управления объектом и командоаппараты подобного принципа действия удобны для применения в ЭСУ с целью обучения автомата, если он реализован как адаптивная система. Возможно решение и другой задачи обучения ЧО оптимальному управлению, если такое управление реализуется автоматом. Аналогичные возможности открываются при использовании автомата ЭСУ с искусственным интеллектом, например, автомата, которому придаются свойства «рационального агента», реализующего функцию, которая отображает последовательность актов восприятия в действия [7].

Представление управляемых движений технического объекта в пространстве состояний. Для описания динамики состояния объекта ЭСУ в зависимости от положения органа управления командоаппарата используем дифференциальные уравнения, получаемые на основе законов физики. Для технического объекта (ТО) ЭСУ с сосредоточенными параметрами имеем диффе-

ренциальные уравнения, которые всегда можно привести к нормальной системе обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1,\, x_2,...,x_{No},\, u_1,\, u_2,...,u_P);\\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1,\, x_2,...,x_{No},\, u_1,\, u_2,...,u_P);\\ &\vdots\\ \dot{x}_{No} &= f_{No}(x_1,\, x_2,...,x_{No},\, u_1,\, u_2,...,u_P), \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

где $x_1, x_2, \ldots x_{No}$ — переменные состояния объекта, называемые также *фазовыми координатами*; u_1, u_2, ..., u_P — переменные управления объекта, каждая из которых определяется положением органа управления соответствующего командоаппарата.

Предполагается, что функции $f_1(*), f_2(*), \ldots, f_{No}(*)$ правых частей уравнений (7) дифференцируемы по переменным состояния.

Выделим из общего количества P командоаппаратов интерфейса ЭСУ:

– P_a аппаратов управления $u_1, u_2, \ldots, u_{Pa}$ с двухпозиционным ОрУ модели 2П (1);

– P_b аппаратов управления $u_{Pa+1}, u_{Pa+2}, \ldots, u_{Pa+}u_{Pa+Pb}$ с трехпозиционным ОрУ модели 3П(2);

– P_c аппаратов управления $u_{Pa+Pb+1}, u_{Pa+Pb+2}, \ldots, u_{Pa+Pb+Pc}$ с многопозиционным ОрУ модели МП (3), (4);

– P_d аппаратов управления $u_{Pa+Pb+Pc+1}, u_{Pa+Pb+Pc+2}, \ldots, u_P$ с многопозиционным ОрУ модели МПС (5), (6).

Введем дополнительно:

– P_c переменных состояния $x_{No+1}, x_{No+2}, \ldots, x_{No+Pc}$, вместо $u_{Pa+Pb+1}, u_{Pa+Pb+2}, \ldots, u_{Pa+Pb+Pc}$ в соответствии с (3);

– Pd переменных состояния $x_{No+Pc+1}, x_{No+Pc+3}, \ldots, x_{No+Pc+2Pd-1}$, вместо $u_{Pa+Pb+Pc+1}, u_{Pa+Pb+Pc+2}, \ldots, u_P$ и еще Pd переменных состояния $x_{No+Pc+2}, x_{No+Pc+4}, \ldots, x_{No+Pc+2Pd}$ в соответствии с моделью МПС (5).

Таким образом, количество переменных состояния x_i в уравнениях(7) для ЭСУ увеличено на $P_c + 2Pd$ фазовых координат $x_{No+1}, x_{No+2}, \ldots, x_{No+Pc+2Pd}$.

Обозначим через $N = No + Pc + 2Pd$ общее количество переменных состояния ТО $x_1, x_2, \ldots, x_{No}, x_{No+1}, \ldots, x_N$ и объединим переменные состояния в вектор (матрицу-столбец):

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}. \qquad (8)$$

Тогда, используя для каждого управления $u_1, u_2, \ldots, u_P$ его модель, в соответствии с выражениями (1) – (6), получим множество Z элементарных представлений движения ТО для ЭСУ:

$$Z = \left\{ \dot{X} = F^r(X),\, r = 1, 2, ..., R \right\}, \qquad (9)$$

в котором все элементарные неполные представления движения [5]:

$$\dot{X} = F^r(X), \qquad (10)$$

при $r = 1, 2, \ldots, R$ имеют попарно различные векторы-функции правых частей:

$$F^r(X) = \begin{bmatrix} f_1^r(x_1, x_2, ..., x_N) \\ f_2^r(x_1, x_2, ..., x_N) \\ \vdots \\ f_N^r(x_1, x_2, ..., x_N) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} f_1^k(x_1, x_2, ..., x_N) \\ f_2^k(x_1, x_2, ..., x_N) \\ \vdots \\ f_N^k(x_1, x_2, ..., x_N) \end{bmatrix} = F^k(X), \qquad (11)$$

если $k \neq r$ (различия между $F^r(X)$ и $F^k(X)$ обусловлены моделями органов управления).

Теоретически максимальное количество элементов множества (9) представлений элементарных движений составит

$$R = 2^{Pa} \cdot 3^{Pb+Pc+Pd}. \quad (12)$$

Каждому представлению элементарного движения объекта ЭСУ из множества (9) поставим в соответствие определенную структуру технического объекта ЭСУ. Изменение структуры объекта при совместном управлении объектом происходит дискретно в результате перемещения любого органа управления любого командоаппарата, скорости или ускорения перемещения органа управления в соответствии с моделями (1) – (6). У ЧО длина интервала времени между соседними моментами смены структур путем воздействия на орган управления ограничена снизу величиной 0,5 с [4] (показано на рис. 1).

Поведение объекта ЭСУ при управлении с помощью органа управления отображается в пространстве состояний $R^{1+N} = \{t \times x_1 \times x_2 \times \ ... \ \times x_N\}$ изображающей точкой, перемещающейся во времени t по некоторой непрерывной траектории. При моделировании управляемого поведения (движения) объекта ЭСУ траектория определяется в результате интегрирования дифференциальных уравнений (10) из множества (9) и стыковки их решений в моменты, когда r-я вектор-функция $F^r(X)$ в уравнении (10) изменяется на другую k-ю вектор-функцию $F^k(X)$ по условию (11). Точки траектории движения объекта ЭСУ, в которых стыкуются решения уравнений, представляют собой угловые точки траектории (в которых, по крайней мере, одна переменная состояния не имеет производную по времени). Пример траектории движения объекта в пространстве R^{1+2} приведен на рис. 4.

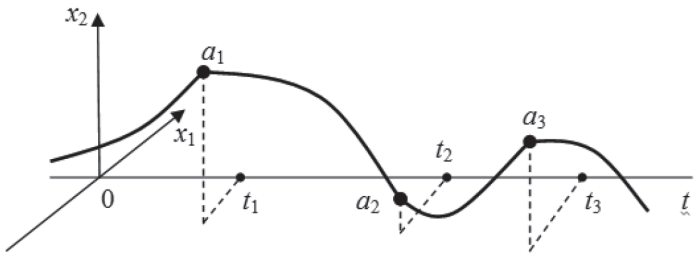


Рис. 4. Пример фрагмента траектории движения объекта в пространстве состояний R^{1+2}

Моментам времени t_1, t_2, t_3 соответствуют угловые точки a_1, a_2, a_3 траектории.

Неполные представления элементарных движений судна. Воспользуемся описанием плоского движения судна в неподвижной системе координат [10], выделив в нем дифференциальные уравнения, которые являются неполным представлением продольного движения судна. В соответствии с дифференциальными уравнениями (7) запишем:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + v_т; \\ \dot{x}_2 &= a_1 x_2^2 + a_2 x_2 u + a_3 u, \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

где x_1 — координата центра масс судна в неподвижной системе координат (вдоль продольной оси судна); x_2 — скорость продольного движения судна относительно воды при $x_2 \geq 0$; u — упор движителей, действующий в направлении продольной оси; $v_т$ — скорость течения воды в месте расположения судна; a_1, a_2, a_3 — коэффициенты, числовые значения которых зависят от осадки судна T, глубины судового хода H и, возможно, от других характеристик внешней среды.

Расчетные значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 для судна «Волго-Дон» [10] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов дифференциальных уравнений движения судна

Коэффициент	Единица измерения	Множитель	Осадка судна T, м					
			1,5		2,5		3,5	
			Глубина судового хода H, м					
			10	20	10	20	10	20
a_1	$м^{-1}$	10^{-3}	–2,39	–2,22	–1,75	–1,55	–1,03	–0,88
a_2	$с^{-1}$	10^{-2}	–1,79	–1,79	–0,46	–0,46	–0,18	–0,18
a_3	$мс^{-2}$	10^{-1}	2,18	2,18	0,93	0,93	0,40	0,40

Упор u создается двумя винтами, каждый из которых создает свой упор, который для открытого винта может принимать значения из диапазона от –0,38 до 0,50 в модели (13), а для комплекса винт – насадка — от –0,27 до 0,50. В указанных пределах изменяется упор винта при управлении скоростью его вращения. Для описания связи между положением органа управления (главным двигателем) и упором применяется модель МП (3), (4). Количество представлений элементарных движений судна (структур объекта) $R = 3^2 = 9$ определяется согласно выражению (12).

Общее представление элементарных движений получим, дополнив систему уравнений (13) уравнением (3) для каждого винта:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + v_T; \\ \dot{x}_2 &= a_1 x_2^2 + (a_2 x_2 + a_3)(x_3 + x_4); \\ \dot{x}_3 &= \omega_1; \\ \dot{x}_4 &= \omega_2, \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

где x_3, x_4 — фазовые координаты, введенные в модель (13) вместо u; ω_1, ω_2 — скорости перемещения органа управления упором винтов судна при условии (4).

Конкретизируем множество (9) неполных представлений элементарных продольных движений судна и пронумеруем их от одного до девяти в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Нумерация элементов множества представлений элементарных движений

ω_1 / ω_2	$\omega_2 = \omega_в$	$\omega_2 = 0$	$\omega_2 = -\omega_н$
$\omega_1 = \omega_в$	1	2	5
$\omega_1 = 0$	3	4	8
$\omega_1 = -\omega_н$	6	7	9

Чтобы конкретизировать, например, представление движения под номером 3, нужно в систему дифференциальных уравнений вместо ω_1 подставить 0, а вместо ω_2 — $\omega_в$. Для рассматриваемых судов имеем $\omega_в = \omega_н = 0{,}12$ с$^{-1}$.

Результаты (Results)

Натурные исследования режимов продольного движения судов при вводе в камеру шлюза, инициированные Ю. М. Кулибановым [11], показали, что элементарные движения судна из построенного множества реализуются при ручном управлении судном [12]. На рис. 5 в качестве примера представлены эпюры упоров u_1 и u_2 винтов двух судов «Волго-Дон», введенных в камеру шлюза в разное время при одинаковых внешних условиях. Эпюры построены на основе осциллограмм записи частоты вращения винтов. Из-за сжатия графиков по времени, переходные процессы отражены вертикальными отрезками эпюр.

На времени ввода судна в шлюз $[0, t_f]$ (зафиксированы разные значения продолжительности ввода в экспериментах с судами) реализуется последовательность элементарных движений, которая получается в результате последовательных дискретных воздействий судоводителя на орган управления. На рис. 5, *а* над осью времени отмечены цифрами из табл. 2 представления движений на разных участках пути движения судна вдоль причальной стенки в камеру шлюза. Количество реализованных элементарных движений составляет 17. Следует отметить, что при управлении судном не было использовано представление движения с номером 3.

Из сравнения рис. 5, *а* и *б* видно, что отсутствует единообразие в реализации управления движением судна в сходных ситуациях. Количество элементарных движений для показанного на рис. 5, *б* управления равно 35. Несмотря на разное количество управляющих действий, вы-

полненных судоводителями в экспериментах, просматривается следующая закономерность: один из создаваемых винтами упоров (u_2) поддерживается отрицательным по мере приближения судна к месту остановки в камере шлюза (к моменту t_f). Тем самым повышается вероятность безаварийного ввода судна в камеру (без навала на ворота) благодаря тому, что один из главных двигателей поддерживается «горячим», т. е. способным к выполнению экстренного торможения судна в любой момент времени для предотвращения навала на ворота камеры шлюза.

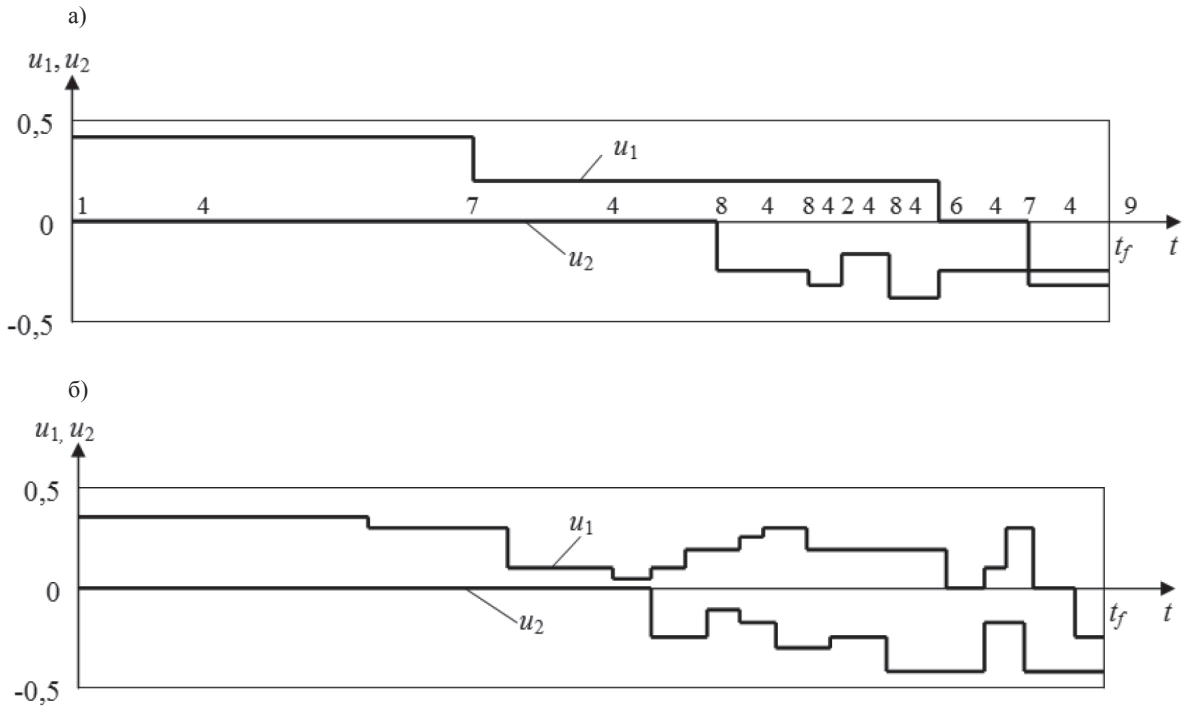


Рис. 5. Эпюры упоров u_1, u_2 винтов судна на времени $[0, t_f]$ ввода судна в камеру шлюза: *а* — Волго-Дон *XX*; *б* — Волго-Дон *YY*

В одном эксперименте (рис. 6, *а*) был отмечен психологический фактор неправильного восприятия судоводителем тормозного пути, повлекший за собой преждевременный переход к режиму активного торможения судна двумя винтами при попытке реализации расчетного ускоренного ввода судна в камеру шлюза (см. рис. 6, *б* и *в*) [12]. Опережение начала торможения по координате x_1 составило $\Delta x_1 = 160$ м. При построении модели расчетного движения (см. рис. 6, *б*) был максимально упрощен алгоритм управления (см. рис. 6, *в*). Принято $u_1 = u_2$ и три представления: 1, 4, 9 элементарных движений (см. табл. 2), включенных в последовательность, состоящую из девяти элементов (показаны цифрами на рис. 6, *в*).

В указанном эксперименте роль «рационального агента» в смысле, определенном в [7], исполняли авторы статьи [11], которые рассчитали и предложили судоводителю алгоритм управления, а также осуществляли контроль текущих значений фазовых координат согласно представлению (14) и фиксировали отклонения в реализации предложенного судоводителю алгоритма управления ввиду отсутствия необходимых технических средств автоматизации управления. Эксперимент показал возможность сокращения количества управляющих действий, выполняемых судоводителем, и повышения качества управления в плане безопасности и сокращения времени ввода судна в камеру шлюза, а в дополнение к этому — необходимость учета квалификации и опыта судоводителя в построении рациональным агентом алгоритма совместного управления движением судна.

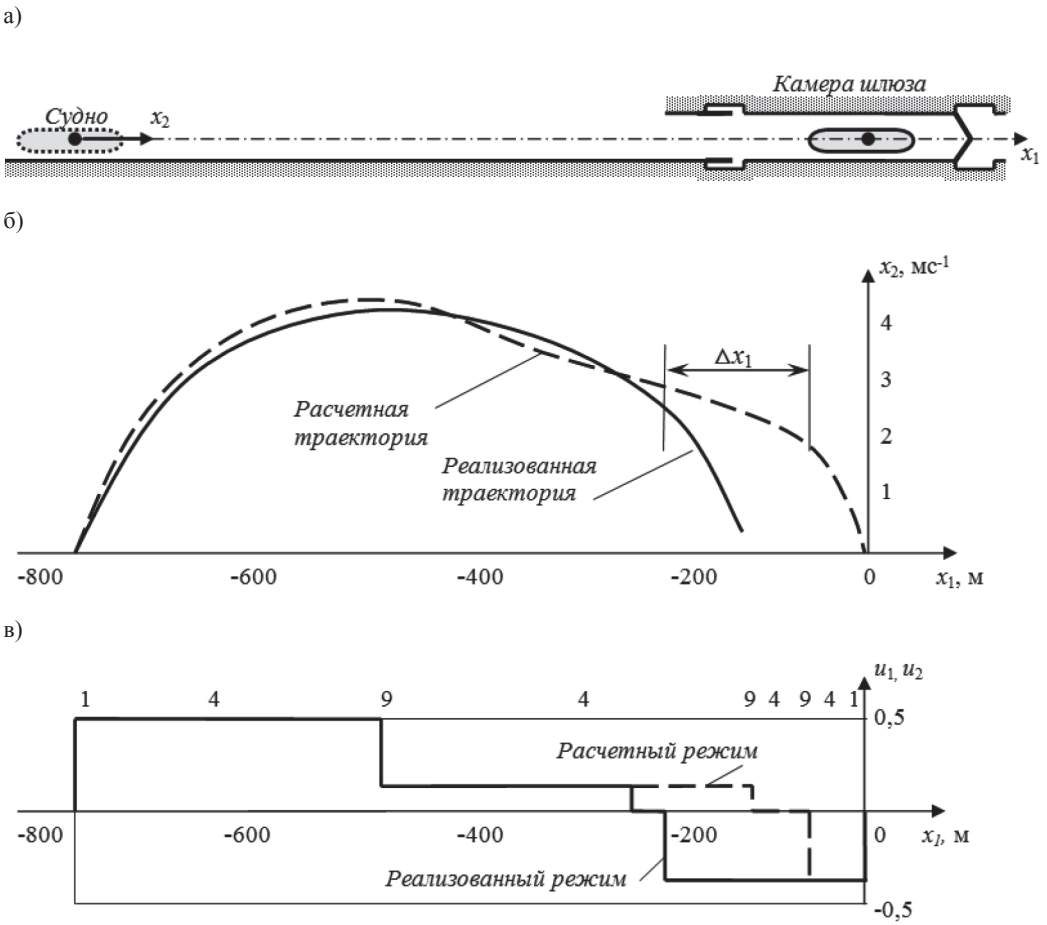


Рис. 6. Ускоренный ввод судна в шлюз:
а — начальное и конечное положения судна при вводе в камеру шлюза;
б — фазовые траектории движения судна; *в* — эпюры упоров винтов

Обсуждение (Discussion)

Распределение функций управления между ЧО и ТСУ в ЭСУ ТО, в максимальной степени учитывающее преимущества и недостатки ЧО и ТСУ, необходимо не только на этапе проектирования системы, но и во время ее эксплуатации. Полученные, например, в авиации результаты от совмещения управляющих действий в автоматизированном управлении истребителем [13] подтверждают целесообразность продолжения исследований в этом направлении. Научную новизну и практическую ценность приобретают исследования по разработке моделей управляемых движений объекта ЭСУ и технических средств, обеспечивающих качественное управление объектом как при совмещении во времени управляющих воздействий на объект со стороны человека-оператора и автомата ЭСУ, так и при условиях, когда один из этих источников управляющих воздействий перестает их создавать по какой-либо причине. Представленные ранее данные о натурных экспериментахс судами в условиях повышенной опасности при вводе судна в камеру шлюза свидетельствуют об актуальности исследований применительно к водному транспорту.

Для реализации машинных алгоритмов совместного управления необходимо приблизить управляющие воздействия на объект, вырабатываемые автоматом ЭСУ, к такой форме, в какой они присущи ЧО. В связи с этим предложен инновационный подход к математическому описанию динамики объекта ЭСУ при совместном управлении объектом на основе конечного множества неполных представлений элементарных движений объекта. Согласно данному подходу, процесс конструирования автоматического управления разделен на построение последовательности элементарных движений и выбор моментов времени смены элементарных движений в определен-

ной последовательности. На первом из этих двух этапов возможно и целесообразно применение средств систем искусственного интеллекта: экспертной системы, базы знаний, системы вывода. При реализации первого этапа в максимальной степени можно учесть «человеческий фактор», проявляющийся в совместном управлении объектом ЭСУ, и организовать оперативное обучение человека-оператора и автомата в процессе функционирования ЭСУ. Для реализации второго этапа предложенные математические модели обеспечивают возможность проведения вычислений на ЭВМ моментов времени смены элементарных движений объекта, которые реализуются как переключения структур технической части ЭСУ с помощью командоаппаратов совместного управления. Предложены постановки и решения задач оптимального дискретного управления объектом [14] на основе указанных моделей. Существенное влияние на содержание исследования, отраженного в статье, оказали работы [4] – [8], [13] и эксперименты, проведенные с судами.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ особенностей эргатических систем управления техническим объектом и результаты натурных экспериментов с судами по управлению движением судна в условиях повышенной опасности при вводе в камеру шлюза показали целесообразность разработки технических средств и моделей совместного управления объектом со стороны ЧО и автомата ЭСУ.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что ЧМИ, применяемый в настоящее время в ЭСУ, нуждается в адаптации к совместному управлению техническим объектом, входящим в состав ЭСУ; необходимо разработать командоаппараты совместного управления, обеспечивающие возможность единовременного и разновременного управления объектом со стороны человека и со стороны автомата без каких-либо дополнительных команд на переключение режимов управления. Принцип действия таких командоаппаратов показан в статье с помощью изобразительных и математических моделей аппаратов, рекомендованных для применения в ЧМИ эргатической системы совместного управления техническим объектом.

Разработаны математические модели, описывающие формирование команд совместного управления объектом ЭСУ и управляемое движение объектав пространстве состояний с помощью неполных представлений элементарных движений, выстраиваемых в определенную последовательность на конечном отрезке времени управления объектом. Обоснована возможность применения технических средств систем искусственного интеллекта и методов теории оптимального управления для конструирования и реализации совместного управления техническим объектом с рациональным распределением функций управления в ЭСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совмещенное управление (управление через САУ) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ooobskspetsavia.ru/2015/11/16/sovmeshhennoe-upravlenie-upravlenie-cherez-sau/ (дата обращения: 27.02.2018).

2. *Тырва В. О.* Особенности эргатической системы совместного управления техническим объектом / В. О. Тырва // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 438–443.

3. *Доронин А. М.* Человеко-машинное взаимодействие и его показатели / А. М. Доронин, Д. А. Романов, М. Л. Романова // Вестник Адыгейского государственного университета. — 2005. — № 4. — С. 244–250.

4. *Денисов В. Г.* Инженерная психология в авиации и космонавтике / В. Г. Денисов, В. Ф. Онищенко. — М.: Машиностроение, 1972. — 316 с.

5. *Коренев Г. В.* Цель и приспособляемость движения / Г. В. Коренев. — М.: Наука, 1974. — 528 с.

6. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 228 с.

7. *Стюарт Р.* Искусственный интеллект: современный подход / Р. Стюарт, Н. Питер. — 2-е изд. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1408 с.

8. *Макаров И. М.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]. — М.: Наука, 2006. — 333 с.

9. *Shub Y.* Differences between left-and right-hand reaction time rhythms: indications of shifts in strategies of human brain activity / Y. Shub, I. E. Ashkenazi, A. Reinberg // Cognitive brain research. — 1997. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 141–146. DOI: 10.1016/S0926-6410(97)00025-6.

10. *Тырва В. О.* Трансформированные уравнения динамики судна / В. О. Тырва, Э. Б. Якимов // Материалы международной НПК «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — С. 301–305.

11. *Кулибанов Ю. М.* Исследование режимов движения судов проекта 507 при шлюзовании / Ю. М. Кулибанов, В. Н. Бачернихин, В. О. Тырва // Материалы XXVIII научно-технической конференции ЛИВТ. — Л.: ЛИВТ, 1974. — С. 52–55.

12. *Тырва В. О.* Оптимизация управления движением судна в технологическом процессе шлюзования / В. О. Тырва // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. «Проблемы развития транспортной инфраструктуры северных территорий». — Котлас: ГУМРФ, 2014. — С. 22–29.

13. Почему Су-35 самый опасный истребитель в мире? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samyy-opasnyy-istrebitel-v-mire (дата обращения: 23.08.2017).

14. *Тырва В. О.* Согласование элементарных движений объекта по условиям оптимальности в автоматизированном электроприводе / В. О. Тырва // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2016. — С. 215–219.

REFERENCES

1. Sovmeshchennoe upravlenie (upravlenie cherez SAU). Web. 27 Feb. 2018 <http://ooobskspetsavia.ru/2015/11/16/sovmeshhennoe-upravlenie-upravlenie-cherez-sau/>.

2. Tyrva, V.O. “Features of ergatic system joint management of the technical object.” *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel’skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017: 438–443.

3. Doronin, A.M., D.A. Romanov, and M.L. Romanova. “Cheloveko-mashinnoe vzaimodeistvie i ego pokazateli.” *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta* 4 (2005): 244–250.

4. Denisov, V.G., and V.F. Onishchenko. *Inzhenernaya psikhologiya v aviatsii i kosmonavtike*. M.: «Mashinostroenie», 1972.

5. Korenev, G.V. *Tsel’ i prisposoblyaemost’ dvizheniya*. M.: «Nauka», 1974.

6. Pospelov, D.A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. M.: Nauka, 1986.

7. Styuart, R., and N. Piter. *Iskusstvennyi intellekt: sovremennyi podkhod*. 2-d ed. M.: Izdatel’skii dom “Vil’yams”, 2006.

8. Makarov, I.M., V.M. Lokhin, S.V. Min’ko, and M.P. Romanov. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual’nye sistemy upravleniya*. M.: Nauka, 2006.

9. Shub, Yosi, Israel E. Ashkenazi, and Alain Reinberg. “Differences between left-and right-hand reaction time rhythms: indications of shifts in strategies of human brain activity.” *Cognitive brain research* 6.2 (1997): 141–146. DOI: 10.1016/S0926-6410(97)00025-6.

10. Tyrva, V.O., and E.B. Yakimov. “Transformirovannye uravneniya dinamiki sudna.” *Materialy mezhdunarodnoi NPK «Vodnye puti Rossii: stroitel’stvo, ekspluatatsiya, upravlenie»*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009: 301–305.

11. Kulibanov, Yu.M., V.N. Bachernikhin, and V.O. Tyrva. “Issledovanie rezhimov dvizheniya sudov proekta 507 pri shlyuzovanii.” *Materialy XXVIII Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii LIVTa*. L.: LIVT, 1974: 52–55.

12. Tyrva, V.O. “Optimizatsiya upravleniya dvizheniem sudna v tekhnologicheskom protsesse shlyuzovaniya.” *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy razvitiya transportnoi infrastruktury severnykh territorii»*. Kotlas: GUMRF, 2014: 22–29.

13. Pochemu Su-35 samyi opasnyi istrebitel' v mire? Web. 23 Aug. 2017 <http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samyy-opasnyy-istrebitel-v-mire>.

14. Tyrva, V.O. "Coordination of elementary movements of object under the terms of an optimality in the automated electric drive." *Trudy IX Mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*. Perm': Izd-vo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2016: 215–219.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тырва Владимир Оскарович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru*, *v.tyrva@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tyrva, Vladimir O. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *kaf_electroprivod@gumrf.ru*, *v.tyrva@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 г.
Received: March 14, 2018.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-444-451

APPLICATION OF METHODS OF INSTRUMENTAL OBSERVATION AND TESTING IN THE IMPLEMENTATION OF CURRENT PEDAGOGICAL CONTROL IN INFORMATION SYSTEMS OF ESTIMATION AT THE TRAINING OF SPECIALISTS OF THE MARINE FLEET

D. A. Pechnikov

Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, St. Petersburg, Russian Federation

In the article, basing on the data of psychology, pedagogy, ergonomics and qualimetry, basic characteristics and mechanisms for implementing instrumental observation and testing as alternative methods of current pedagogical control in information systems are developed in the training of specialists for the Navy based on data from psychology, pedagogy, ergonomics and qualimetry. The article deals with the implementation of the current pedagogical control in the preparation of various marine specialists for, by two types of technical means: training and training systems (TOS) and computer testing systems (CTS). The methods for achieving monitoring objectives in TOC and CST are different. In TOC, these goals are achieved by methods of instrumental observation, in the CCP — by testing methods. The currently used interpretations of instrumental observation and testing in the process of training of naval specialists are based on the definition of their intended use: "instrumental observation" is the process of monitoring and operational processing of all parameters of the learner's activity in order to draw conclusions about the true level of his academic achievements "; "Testing is a method of research consisting in using standard form tasks, the results of which can be used to judge personal characteristics, as well as the knowledge, skills and skills of the subject." In connection with the coincidence of the goals of the methods under consideration, their interpretation does not allow us to establish differences between them. These differences are determined, firstly, by the ability to control the environment in which the student realizes his activity, and secondly, the systematic (constant, continuous) control actions themselves.

Keywords: automated, current pedagogical control, instrumental observation, testing, information systems, information technologies.

For citation:
Pechnikov, Denis A. "Application of methods of instrumental observation and testing in the implementation of current pedagogical control in information systems of estimation at the training of specialists of the marine fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 444–451. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-444-451.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ В РЕАЛИЗАЦИИ ТЕКУЩЕГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ОЦЕНКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ МОРСКОГО ФЛОТА

Д. А. Печников

Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье на основе данных психологии, педагогики, эргономики и квалиметрии определяются базовые характеристики и механизмы реализации инструментального наблюдения и тестирования как альтернативных методов текущего педагогического контроля в информационных системах при подготовке специалистов для морского флота. Рассматривается реализация текущего педагогического контроля

при подготовке различных морских специалистов двумя видами технических средств: тренажерно-обучающими системами (ТОС) и компьютерными системами тестирования (КСТ). Методы достижения целей контроля в ТОС и КСТ различны. В ТОС эти цели достигаются методами инструментального наблюдения, в КСТ — методами тестирования. Применяемые в настоящее время трактовки инструментального наблюдения и тестирования в процессе подготовки флотских специалистов построены на определении их целевого предназначения: инструментальное наблюдение — это осуществляемый техническими средствами процесс мониторинга и оперативной обработки всех параметров деятельности обучающегося для построения выводов об истинном уровне его учебных достижений; тестирование — метод исследования, заключающийся в использовании заданий стандартной формы, по результатам которых можно судить о личностных характеристиках, а также о знаниях, умениях и навыках испытуемого. В связи с совпадением целей рассматриваемых методов их трактовки не позволяют установить различия между ними. Эти различия определяются, во-первых, возможностями контроля той среды, в которой обучающийся реализует свою деятельность, а, во-вторых, систематичностью (постоянством, непрерывностью) самих контролирующих действий.

Ключевые слова: автоматизированный текущий педагогический контроль, инструментальное наблюдение, тестирование, информационные системы, информационные технологии.

Для цитирования:
Печников Д. А. Применение методов инструментального наблюдения и тестирования в реализации текущего педагогического контроля в информационных системах оценки при подготовке специалистов морского флота / Д. А. Печников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 444–451. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-444-451.

Вводная часть (Introduction)

Согласно [1], [2] возможность, реализации инструментального наблюдения в ТОС достигается за счет создания аппаратно-программными средствами ТОС искусственной виртуальной среды деятельности обучающихся. В ТОС любое действие, которое совершается обучаемым, реализуется в полностью контролируемой среде. Последнее позволяет организовать мониторинг моделируемой среды как «непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта в сравнении с заданными критериями» [3], который обеспечивает измерение, оценивание и документирование характеристик и результатов каждого из действий обучаемого, имеющих внешнее проявление. Инструментальное наблюдение реализует функции мониторинга процесса, оценивания процесса и оценивания результата решения задачи. В соответствии с особенностями тестирования, приведенными в [4] – [6], этот метод текущего педагогического контроля предполагает только восприятие (измерение) и оценивание результата решения задачи. Таким образом, при подготовке специалистов морского флота инструментальное наблюдение реализует более широкую номенклатуру функций контроля, чем тестирование. При этом оба метода не обеспечивают полное достижение целей текущего педагогического контроля.

Входной и итоговый виды контроля относят к *констатирующему типу контроля*, цели которого ограничены проверкой соответствия результатов обучения установленным требованиям Минтранса России. В отличие от них текущий контроль классифицируют как *корректирующий тип контроля*, результаты которого наряду с обнаружением несоответствий в объекте контроля должны включать еще и информацию, необходимую для решения задачи выбора корректирующих действий, устраняющих эти несоответствия. Минимальный объем подобной информации должен включать данные об ошибочных действиях обучающегося и причинах их появления. Инструментальное наблюдение и тестирование такого объема информации о деятельности обучающихся не предоставляют, что определяет необходимость разработки моделей реализации текущего педагогического контроля средствами инструментального наблюдения и тестирования для более качественной подготовки морских специалистов.

Для разработки этих моделей необходимо определить объект, в отношении которого осуществляются все операции педагогического контроля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В педагогической психологии различают два вида основных обучающих воздействий:

1) изложение учебного материала, трактуемое как педагогически направленное воспроизведение обучающим фрагмента учебной деятельности;

2) учебная задача — оставшиеся виды обучающих воздействий (подзадачи, вопросы, указания и т. п.) рассматриваются как разновидности этих двух основных видов.

Результат реализации обучающего воздействия первого типа, каковым является знание, всегда латентен. Поэтому после окончания изложения учебного материала возникает стандартная ситуация контроля усвоения обучающимся предъявленного ему образа изучаемого объекта. Такого рода ситуации могут быть разрешены только путем применения обучающего воздействия второго типа (учебной задачи).

Решение любой задачи всегда представлено в виде действия. Процесс формирования действия всегда латентен, а процесс его реализации может быть латентным тогда, когда он осуществляется в сознании, и явным, когда осуществляется в реальности. Для педагогического контроля важным является то, что «задача рассматривается как некий внешний фактор, детерминирующий активность субъекта» [7]. Этот фактор должен действовать таким образом, чтобы сам процесс решения задачи направлял действия обучающегося на выход из сферы сознания в сферу физической реальности. Поэтому контроль усвоения (освоения) как знаний, так и действий осуществляется одинаково путем постановки таких учебных задач, процесс решения которых направляет действия обучающегося на выход из латентной сферы сознания в сферу физической реальности, которая доступна для внешнего наблюдения. Иначе говоря, при контроле усвоения как знаний, так и действий в качестве объекта контроля всегда выступает действие.

На основании данных эргономики и теории интериоризации [8], [9], в таблице представлена структура действия на различных этапах его освоения.

В соответствии с приведенными в таблице особенностями одно и то же действие может быть представлено в виде следующих типовых функциональных структур (ТФС): 1) ТФС «ориентировка – контроль ориентировки – работа – контроль функционирования (ОКРК)», эквивалентная типовой функциональной единице (ТФЕ) Р («работа») для этапа формирования деятельности во внешней речи; 2) ТФС «работа – контроль функционирования (РК)», эквивалентная ТФЕ Р («работа») для этапа формирования деятельности во внешней речи про себя; 3) ТФС «рабочая операция с самоконтролем функционирования (РСК)», эквивалентная ТФЕ Р («работа») для этапа формирования деятельности во внутренней речи.

Структура действия на этапах освоения его самостоятельного выполнения

<table>
<tr><td rowspan="2">Этап формирования деятельности</td><td colspan="3">Характеристика частей действия</td></tr>
<tr><td>Ориентировочная часть</td><td>Исполнительная часть</td><td>Контрольная часть</td></tr>
<tr><td>Формирование деятельности как внешнеречевой</td><td>Актуализация в сознании алгоритма деятельности, определение выполняемого действия и условий его реализации, формулировка ожидаемого результата</td><td rowspan="3">Выполнение действий в соответствии с нормативным (эталонным) алгоритмом (ориентировочной основой деятельности ООД)</td><td>Контроль ориентировочной и исполнительной части каждого действия</td></tr>
<tr><td>Формирование деятельности во внешней речи про себя</td><td rowspan="2">В сознании не актуализируется (выполняется параллельно с исполнительной частью действия)</td><td>Контроль исполнительной части каждого действия</td></tr>
<tr><td>Формирование деятельности во внутренней речи</td><td>Неосознаваемый контроль деятельности по ее результатам (выполняется параллельно с исполнительной частью действия)</td></tr>
</table>

Отсутствие актуализации определенных элементов (частей) действия не означает, что они полностью «выпадают». «Психологический механизм полноценного действия включает всю систему ему предшествующих форм, которые непосредственно уже не выполняются, но имеются в виду и этим обеспечивают сохранение в сознании логики сокращенного действия» [10], [11].

В описаниях нормативных процедур деятельности все действия представляются как типовые функциональные единицы (ТФЕ) вида Р («работа»). В эргономике [11] обоснована эквивалентность результатов выполнения ТФЕ Р и ТФС ОКРК, ТФС РК, ТФС РСК. На базе этого положения для целей педагогического контроля любое действие, представленное в нормативном описании деятельности в виде ТФЕ Р, целесообразно рассматривать как ТФС ОКРК (рис. 1), включающую все латентные части действия.

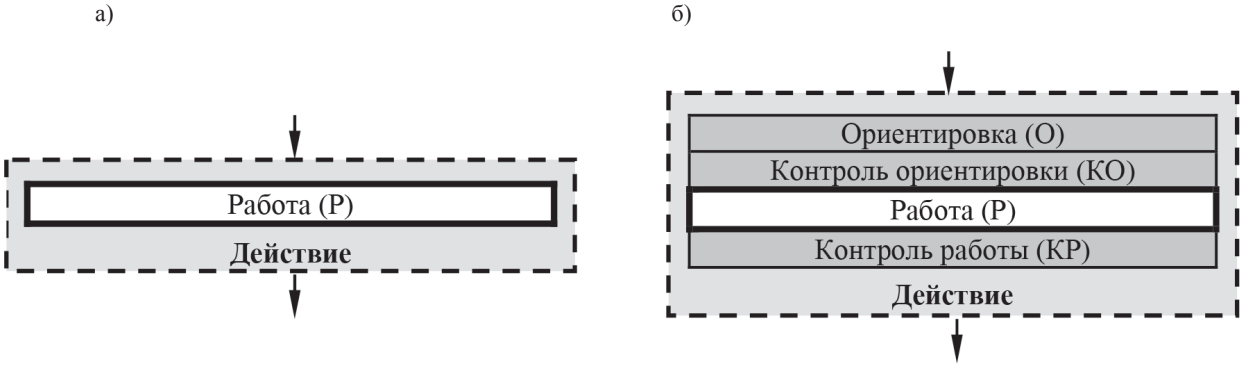


Рис. 1. Структура действия при эталонном описании деятельности (*а*) и при реализации процедуры его контроля (*б*)

Тогда процедура получения минимального объема информации текущего корректирующего контроля может быть представлена как совокупность трех процедур:

– процедуры оценивания результата деятельности;

– процедуры выявления ошибочного элемента деятельности (действия);

– процедуры выявления причин появления ошибочного элемента деятельности (действия).

Первая процедура выполняется всегда, вторая и третья — только при обнаружении ошибочного действия (инструментальное наблюдение) или несоответствия результата деятельности его нормативному варианту (тестирование).

Результаты (Results)

Модель реализации текущего контроля методом и средствами инструментального наблюдения. Представленные в ТОС на рис. 2 процедура наблюдения за действиями обучающегося и процедура оценивания процесса его деятельности начинают выполняться одновременно после постановки обучающемуся задачи и реализуются параллельно вплоть до окончания действий обучающегося.

Процедура оценивания каждого *i*-го ($i = \overline{1,n}$) внешнего действия обучающегося включает сравнение его результата P_i с результатом $P_i^{\text{эт}}$ соответствующего эталонного действия и последующую оценку результата сравнения ($\Delta P_i = P_i - P_i^{\text{эт}}$) по заранее заданному критерию ($|\Delta P_i| \le \Delta P_i^{\text{эт}}$). Если результат P_i не соответствует заданному критерию, то соответствующее действие классифицируется и регистрируется как ошибочное. Интегральная оценка деятельности обучающегося формируется после окончания действий обучаемого.

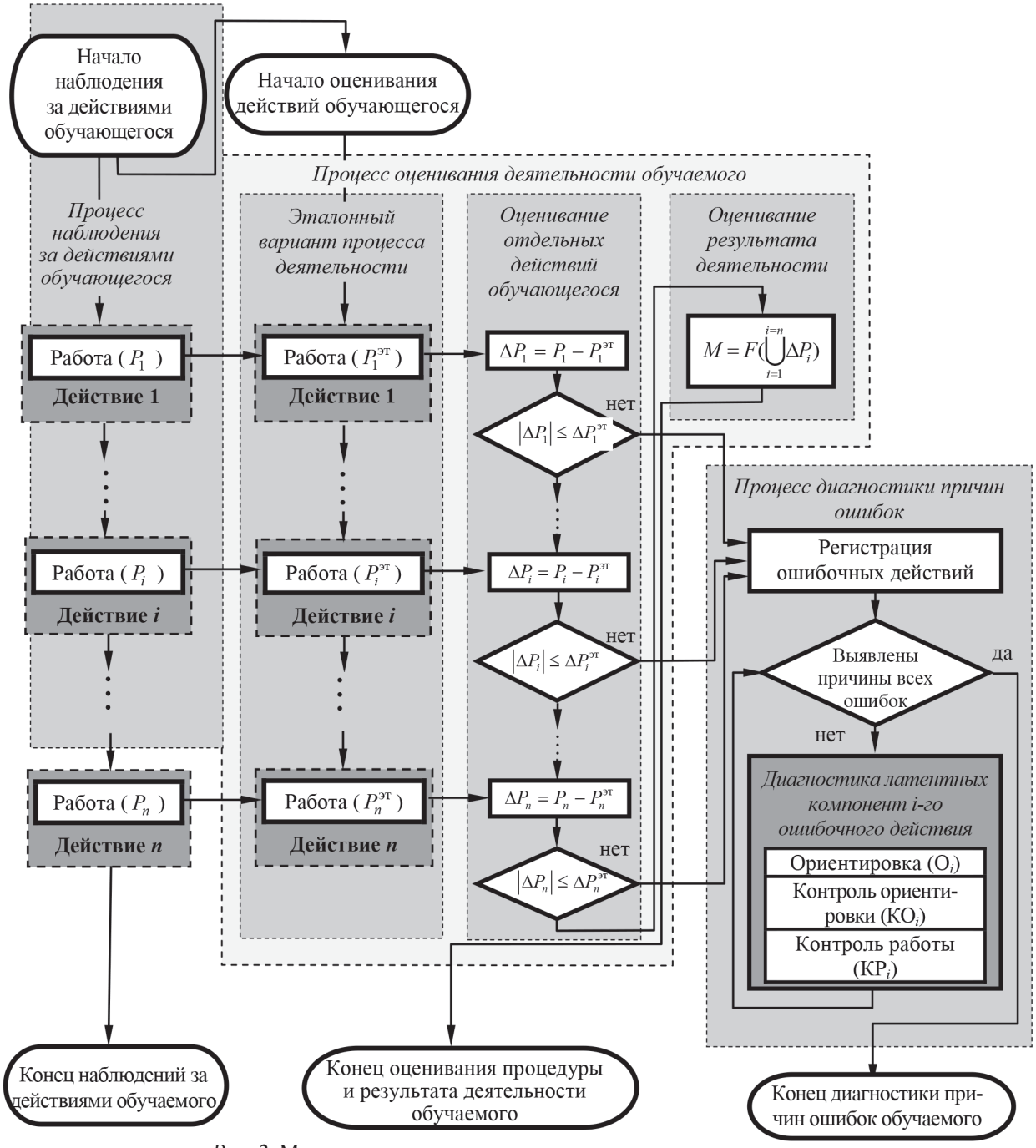


Рис. 2. Модель реализации текущего педагогического контроля методом инструментального наблюдения

Модель реализации текущего педагогического контроля средствами тестирования. В соответствии с принципом эквивалентирования эргономики [12], [13] любая сложная процедура деятельности может быть представлена («свернута») в виде ТФЕ, значения показателей которой эквивалентны показателям исходной процедуры, и, наоборот, любая ТФЕ может быть представлена («развернута») в виде детализированной процедуры. На этом основании деятельность, направленная на решение любой задачи, может быть представлена в виде единственной ТФЕ, что и реализуется в каждом тестовом задании (ТЗ). С учетом этого реализация текущего педагогического контроля методом тестирования может быть представлена в виде, приведенном на рис. 3.

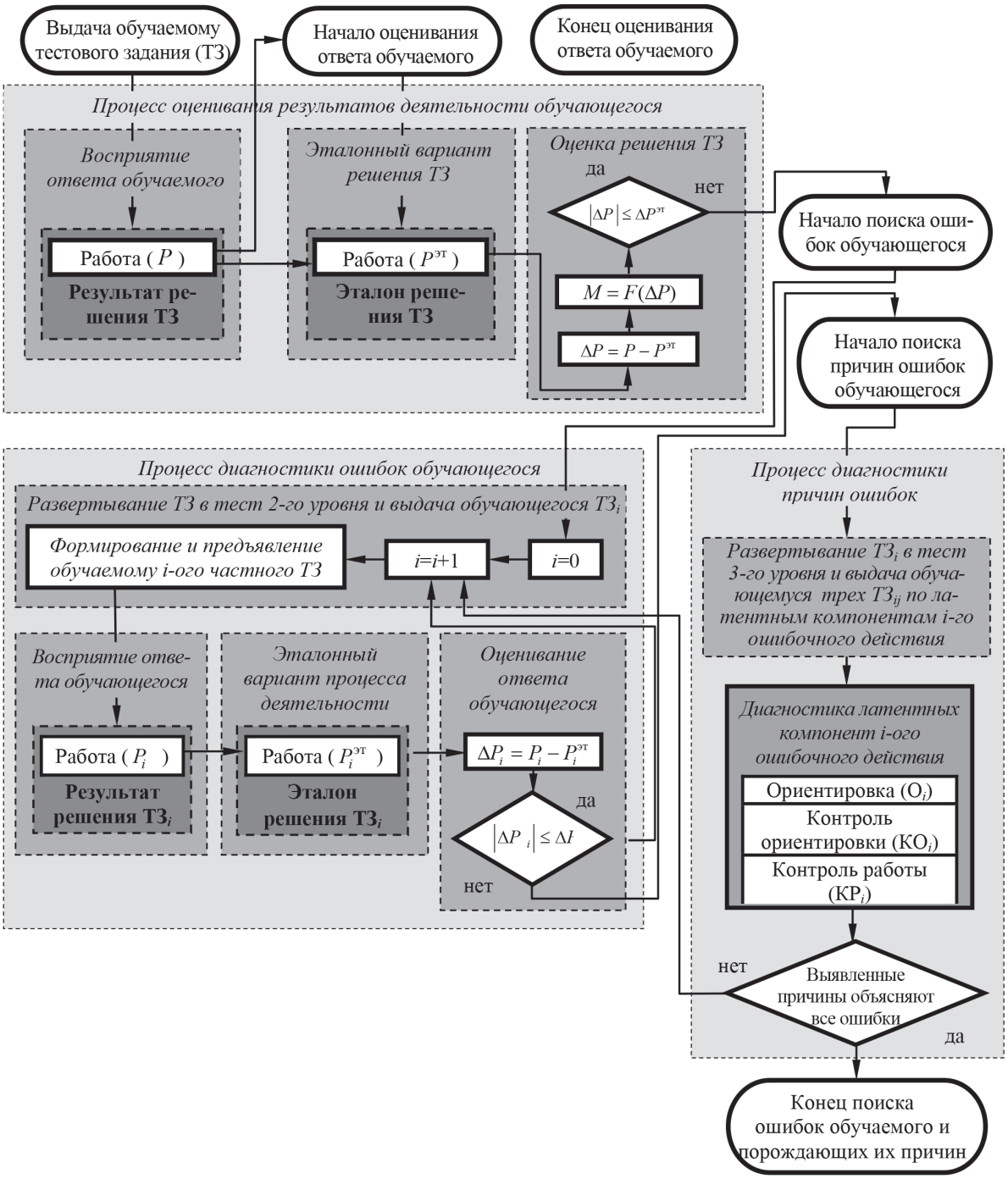


Рис. 3. Модель реализации текущего педагогического контроля методом тестирования

Для реализации представленной процедуры любое ТЗ должно быть представлено в виде трехуровневой структуры, приведенной на рис. 4.

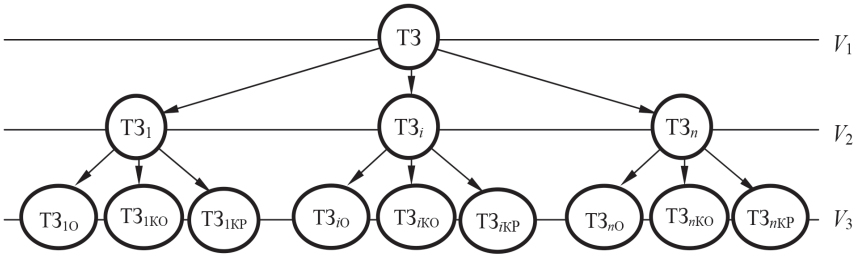


Рис. 4. Структура системы ТЗ, обеспечивающей достижение целей текущего корректирующего педагогического контроля

В этой структуре поиск ошибки в ТЗ первого уровня производится путем выдачи обучающимся ТЗ второго уровня, диагностирующего все действия для решения задачи первого уровня, которые могут быть представлены в виде внешних. Обнаружение ошибки в ТЗ второго уровня вызывает необходимость поиска причины ее появления. Эта задача решается путем выдачи обучающемуся ТЗ третьего уровня, которые выявляют особенности умственных действий, направленных на выполнение ориентировки, контроля ориентировки и контроль выполнения ошибочного действия.

Выводы (Summary)

Приведенные модели реализации текущего корректирующего контроля деятельности обучающихся позволяют сделать вывод вывод о том, что в основе методов как инструментального наблюдения, так и тестирования лежит процедура оценки соответствия результата рассматриваемого действия некоторому эталону. Оба метода реализуют следующие процедуры:

– оценивания результата деятельности;

– выявления ошибочного элемента деятельности;

– выявления причин появления ошибочного элемента.

Различия рассматриваемых методов состоят только в последовательности реализации этих процедур.

Если необходимо оперативно выявить уровни подготовки обучающихся, то целесообразно применять метод тестирования. Если ставится цель полного освоения изучаемых объектов, то целесообразно использовать метод инструментального наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Печников А. Н.* Альтернативные подходы к проектированию и внедрению компьютерных технологий обучения / А. Н. Печников, Т. П. Аванесова, А. Н. Шиков // Образовательные технологии и общество. — 2013. — Т. 16. — № 2. — С. 433–446.

2. *Аванесов В. С.* Композиция тестовых заданий / В. С. Аванесов. — 4-е изд. — М.: Центр тестирования, 2002. — 237 с.

3. *Печников А. Н.* Эффективность электронного обучения как проблема педагогической информатики / А. Н. Печников, А. Н. Шиков // Педагогическая информатика. — 2013. — № 3. — С. 49–59.

4. *Аванесов В. С.* Научные проблемы тестового контроля знаний: монография / В. С. Аванесов. — М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1994. — 135 с.

5. *Багрецов С. А.* Оценка знаний обучающихся в автоматизированных обучающих системах / С. А. Багрецов. — СПб.: ПВУРЭ ПВО, 1994. — 192 с.

6. *Опарина Н. М.* Адаптивное тестирование / Н. М. Опарина. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 95 с.

7. *Ветров Ю. А.* Проектирование и применение компьютерных технологий обучения. Ч. 1. Концепция САО и моделирование процессов деятельности. Кн. 1 / Ю. А. Ветров. — СПб: Изд-во БГТУ, 2003. — 195 с.

8. *Ким В. С.* Тестирование учебных достижений: монография / В. С. Ким. — Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2007. — 214 с.

9. *Переверзев В. Ю.* Технология разработки тестовых заданий: справ. руководство / В. Ю. Переверзев. — М.: Е-Медиа, 2005. — 265 с.

10. *Балл Г. А.* Теория учебных задач: психолого-педагогический аспект / Г. А. Балл. — М.: Педагогика, 1990. — 184 с.

11. *Талызина Н. Ф.* Управление процессом усвоения знаний / Н. Ф. Талызина. — 2-е изд., доп., испр. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 345 с.

12. *Губинский А. И.* Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. — Л.: Наука, 1982. — 270 с.

13. *Boyd J. R.* (September 3, 1976). Destruction and Creation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.goalsys.com/books/documents/DESTRUCTION_AND_CREATION.pdf (дата обращения: 22.02.2018).

REFERENCES

1. Pechnikov, A.N., T.P. Avanesova, and A.N. Shikov. "Al'ternativnye podkhody k proektirovaniyu i vnedreniyu komp'yuternykh tekhnologii obucheniya." *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* 16.2 (2013): 433–446.

2. Avanesov, B.C. *Kompozitsiya testovykh zadanii. Uchebnaya kniga dlya prepodavatelei vuzov, uchitelei shkol, aspirantov i studentov pedvuzov*. 4-th ed. M.: Tsentr testirovaniya, 2002.

3. Pechnikov, A.N., and A.N. Shikov. "Effektivnost' elektronnogo obucheniya kak problema pedagogicheskoi informatiki." *Pedagogicheskaya informatika* 3 (2013): 49–59.

4. Avanesov, V.S. *Nauchnye problemy testovogo kontrolya znanii: Monografiya*. M.: Issledovatel'skii tsentr problem kachestva podgotovki spetsialistov, 1994.

5. Bagretsov, S.A. *Otsenka znanii obuchayushchikhsya v avtomatizirovannykh obuchayushchikh sistemakh*. SPb.: PVURE PVO, 1994.

6. Oparina, N.M. *Adaptivnoe testirovanie*. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007.

7. Vetrov, Yu.A. *Proektirovanie i primenenie komp'yuternykh tekhnologii obucheniya. Chast' 1. Kontseptsiya SAO i modelirovanie protsessov deyatel'nosti. Kn. 1.* SPb: BGTU, 2003.

8. Kim, V.S. *Testirovanie uchebnykh dostizhenii: Monografiya*. Ussuriisk: Izda-tel'stvo UGPI, 2007.

9. Pereverzev, V.Yu. *Tekhnologiya razrabotki testovykh zadanii: spravochnoe rukovodstvo.* M.: E-Media, 2005.

10. Ball, G.A. *Teoriya uchebnykh zadach: Psikhologo-pedagogicheskii aspekt*. M.: Pedagogika, 1990.

11. Talyzina, N.F. *Upravlenie protsessom usvoeniya znanii*. 2nd ed. M.: Izd-vo MGU, 1984.

12. Gubinskii, A.I. *Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem*. L.: Nauka, 1982.

13. Boyd, John R. (September 3, 1976). Destruction and Creation. Web. 22 Feb. 2018 <http://www.goalsys.com/books/documents/DESTRUCTION_AND_CREATION.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Печников Денис Андреевич —
кандидат технических наук, доцент
Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова
197045, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1
e-mail: *19pda72@bk.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pechnikov, Denis A. —
PhD, associate professor
Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov
17/1 Ushakovskaya naberezhnaya, St. Petersburg, 197045, Russian Federation
e-mail: *19pda72@bk.ru*

Статья поступила в редакцию 12 марта 2018 г.
Received: March 12, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461

INFORMATION TECHNOLOGY OF GEOCHRONOLOGICAL TRACKING FOR HYPOTHESES TESTING IN RESEARCH OF SHIP USE

Y. A. Ivakin, S. N. Potapichev

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

Information technology of the geochronological tracking is an assembly of processes that accumulate and integrate data about geographic relocation of historical figures for a given time interval and represent the results as a generalizing graph in GIS. From the viewpoint of its applied aspect, this information technology is scientific methodological and program tools to automatize certain issues related to biographical and geographical data merge on the basis of geoinformation systems and corresponding geoinformation technologies. It is an example of a specific information technology developed to help employing geographical interpretation of their subject domain when solving research problems. The methodology bases on the object-oriented approach to modeling within GIS domains and ontologies widely used in modern programming and complex software systems development. Hypotheses on the stable tendencies in migration could be represented as the above graph's sub-graphs. Such tendencies testing would be reduced to the search and evaluation of the statistical significance for the matching graphs' isomorphism. The novelty of the solution proposed is the principles of biographical and geographical data integration. The proposed paper deals with a consideration of qualitatively new possibilities of such an approach and the corresponding mathematic and algorithmic apparatus.

Keywords: geographic information systems, GIS — technologies for research; geochronological track and tracking; graphs' isomorphism; statistical hypotheses testing; GIS based interdisciplinary research.

For citation:
Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapichev. "Information technology of geochronological tracking for hypotheses testing in research of ship use." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.

УДК 681.1.003

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕКИНГА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Я. А. Ивакин, С. В. Потапычев

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Информационная технология геохронологического трекинга есть совокупность процессов накопления и интеграции данных о географическом перемещении в ретроспективе объектов (судов, кораблей и др.) или личностей за установленный период времени с представлением результатов в виде обобщающего графа в геоинформационной системе (ГИС). Эта информационная технология в прикладном аспекте представляет собой научно-методический и программный инструментарий для автоматизации определенного класса ретроспективно-исследовательских задач, связанного со слиянием биографических и географических данных на базе ГИС и соответствующих геоинформационных технологий. Она является примером узкоспециализированных ГИС-технологий, разрабатываемых в интересах специалистов, использующих географическую интерпретацию своей предметной области при решении исследовательских задач ретроспективного характера на морском транспорте. Основной методологической базой данной работы является объектно-ориентированный подход к моделированию в ГИС предметных областей на базе онтологий, широко применяющихся в современном программировании и разработке сложных программных систем. Гипотезы об устойчивых тенденциях в указанной миграции объектов (судов, кораблей и др.) или личностей за установленный период времени представимы

как подграфы указанного графа. Проверка таких гипотез сводится к поиску и оценке статистической значимости изоморфизма соответствующих графов. Новизна предлагаемых решений заключается в разработке принципов реализации интеграции биографической, пространственно-координатной и географической информации для исследовательской сферы научного знания. Рассмотрению качественно новых возможностей такого подхода и соответствующего математико-алгоритмического аппарата, а также перспектив их применения в сфере водного (прежде всего, морского) транспорта посвящена данная статья.

Ключевые слова: географические информационные системы, ГИС-технологии для ретроспективных исследований, геохронологический трек и трекинг, изоморфизм графов, проверка статистических гипотез, междисциплинарные исследования на базе ГИС.

Для цитирования:
Ивакин Я. А. Информационная технология геохронологического трекинга для проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта / Я. А. Ивакин, С. В. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.

Введение (Introduction)

В работах [1] – [3] представлена и детально описана специализированная информационная технология геохронологического трекинга, которая представляет собой совокупность методов, моделей, приемов, методик и способов сбора, передачи, обработки, отображения и выдачи потребителю информации об обобщении геохронологических треков объектов (кораблей, судов и др.) или личностей. В свою очередь, построение геохронологического трека исторической личности (индивида) или исторического объекта на основании геопространственной интерпретации его биографической информации есть интеграция хронологических и географических данных в виде графа, соединяющего географические точки нахождения указанных объектов или личности. При этом вершины такого графа имеют строгую ретроспективно-географическую привязку, а дуги носят условно-логический характер.

Проведенные апробации и моделирование геохронологического трекинга показали, что итоговый граф для представительной выборки индивидов может иметь сложную и высокосвязную (и даже полносвязную) структуру. Этот факт позволяет рассматривать итоговый граф геохронологического трекинга как основу для исследования различных миграционных процессов, выявления некоторых частных закономерностей в перемещении объектов, личностей или социальных групп, а также проверять статистические гипотезы о характере перемещений. Представительность выборки объектов или личностей, принятой для геохронологического трекинга, определяет статистическую устойчивость получаемых выводов.

Одним из направлений создания научно-методического инструментария, поддерживающего указанные исследования, является широкое применение и компьютерная интерпретация методов теории графов на базе геохронологического трекинга, в частности алгоритмов поиска изоморфизма графов (распознавания изоморфного вложения подграфа в более сложный граф). Предметная интерпретация этих методов в предметной области исследований исторической информатики открывает широкие возможности для анализа различных сетевых структур, и прежде всего, геохронологических треков.

Полнофункциональное развитие компьютерной интерпретации методов теории графов на базе геохронологического трекинга способно обеспечить новое качество ретроспективных исследований объектов водного транспорта с использованием современного ГИС-инструментария. Оно выражается в предоставлении возможности исследователю использовать количественные методы соответствующего логико-аналитического аппарата в своей предметной области. Детализация указанных возможностей с раскрытием существа соответствующих математических и алгоритмических решений, а также описание новых путей их применения в современных логистических исследованиях является предметом рассмотрения данной статьи.

Методы и материалы (Methods and materials)

Оценка статистической значимости принятия гипотз на базе геохронологического трекинга. Выявление фактов ретроспективных географических процессов как устойчивых структурных вложений в структуре соответствующего геохронологического трека обладает очевидными характеристиками риска принятия решения об их наличии. Иными словами, может быть оценена доверительная вероятность в заключении об установлении того или иного факта.

Первоначальное множество исторических объектов или личностей, принятое для геохронологического трекинга, рассматривается как генеральная совокупность в математическом аппарате проверки статистических гипотез. Выборка числа индивидов, подтвердивших своими перемещениями в географическом пространстве соответствующую гипотезу-подграф, определяет статистическую устойчивость получаемых выводов исследования. Проверка корректности принятия той или иной гипотезы сводится к оценке статистической значимости вывода о выделении соответствующего изоморфного подграфа в составе геохронологического трека по указанной выборке из генеральной совокупности. При этом задается уровень значимости (риска принятия неправильной гипотезы) как вероятности, обратной к доверительной вероятности принятия правильного решения p, т. е.

$$p = 1 - \alpha. \tag{1}$$

Анализ значимости числа индивидов, подтвердивших своими перемещениями в географическом пространстве соответствующую гипотезу-подграф в сравнении с общим числом индивидов, учтенном при геохронологическом трекинге, может быть проведен путем использования методики статистических сравнений, изложенной в [4]. При этом анализируется статистическое отличие разницы $\Delta_г$ между указанными числами от нуля. Такой анализ значимости, как правило, проводится за семь логических шагов.

Ш а г 1. Выдвигается две статистических гипотезы:

$$\left.\begin{array}{l} H_0 : \Delta_г = 0 - \text{незначимо}; \\ H_1 : \Delta_г > 0 - \text{значимо}, \end{array}\right\} \tag{2}$$

где H_0 — гипотеза, что полученное значение $\Delta_г$ статистически незначимо (нет статистически достаточного числа индивидов для выделения искомого подграфа в составе геохронологического трека); H_1 — гипотеза, что полученное $\Delta_г$ статистически значимо (количество индивидов, подтверждающих своими перемещениями искомый подграф в составе геохронологического трека, статистически значимо и достаточно для его выделения).

Ш а г 2. Поскольку результаты $\Delta_г$ получены по выборке числа индивидов, подтвердивших своими перемещениями в географическом пространстве соответствующую гипотезу-подграф, то размерность этой выборке принимается за число испытаний n.

Ш а г 3. Принимается уровень значимости α — например, равным 0,05. Тогда доверительная вероятность принятия исследовательской гипотезы, согласно (1), будет 0,95.

Ш а г 4. Осуществляется выбор тестовой статистики из табулированных вариантов. Этот выбор определяется размером выборки числа индивидов, подтвердивших своими перемещениями в географическом пространстве соответствующую гипотезу-подграф. Если размерность генеральной совокупности и выборки обеспечивают выполнение статистического закона больших чисел, то в качестве тестовой статистики могут быть приняты величины, имеющие широко известные распределения (например, распределение χ^2). Для малых (в статистическом понимании) выборок в качестве тестовой статистики традиционно принимаются величины, имеющие t-распределение Стьюдента с $(n - 1)$ степенями свободы.

Ш а г 5. Производится определение области принятия статистической гипотезы. Для этого из соответствующих таблиц (базы данных) выбирается критическое значение тестовой статистики $t_{пр}$ при принятом уровне значимости α, что, согласно (1), определяет доверительную вероятность γ.

Шаг 6. Формируется итоговое математическое правило проверки статистической гипотезы:

$$\left.\begin{aligned} H_0 : t \le t_{\text{пр}}; \\ H_1 : t > t_{\text{пр}}. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Шаг 7. Выполнение проверки в соответствии с правилом (3) путем расчета текущего значения тестовой статистики t. Формулирование вывода: при выполнении условия H_1 из правила (3) значение $\Delta_г$ следует считать значимым при уровне доверия γ.

Таким образом, предлагаемая методика оценки статистической значимости принятия гипотез позволяет ввести вероятностную меру степени доверия к принимаемым исследовательским решениям по интерпретации соответствующих подграфов геохронологического трека.

Представление проверки исследовательских гипотез в виде задачи распознавания изоморфного вложения графа. Результатом реализации функциональности программного компонента «Геохронологический трекинг» является географическая карта, на которую наносится граф, обобщающий геохронологические треки индивидов, данные о перемещениях которых занесены в базу данных [1]. Пример такой реализации показан на рис. 1. Указанный граф далее рассматривается как базовый, в рамках которого определяется подграф, изоморфный заданному. При этом изоморфизм графов понимается как отношение эквивалентности на множестве графов. Изоморфным отображением одного графа на другой называется взаимно однозначное отображение вершин и рёбер одного графа соответственно на вершины и рёбра другого графа, при котором сохраняется отношение инцидентности. Два графа называются *изоморфными*, если существует изоморфное отображение одного из этих графов на другой [4]. *Инцидентность* — геометрический термин, употребляемый для обозначения отношения принадлежности (связи, соединения) основных объектов геометрии (точки, прямые, плоскости и т. д.) [5].

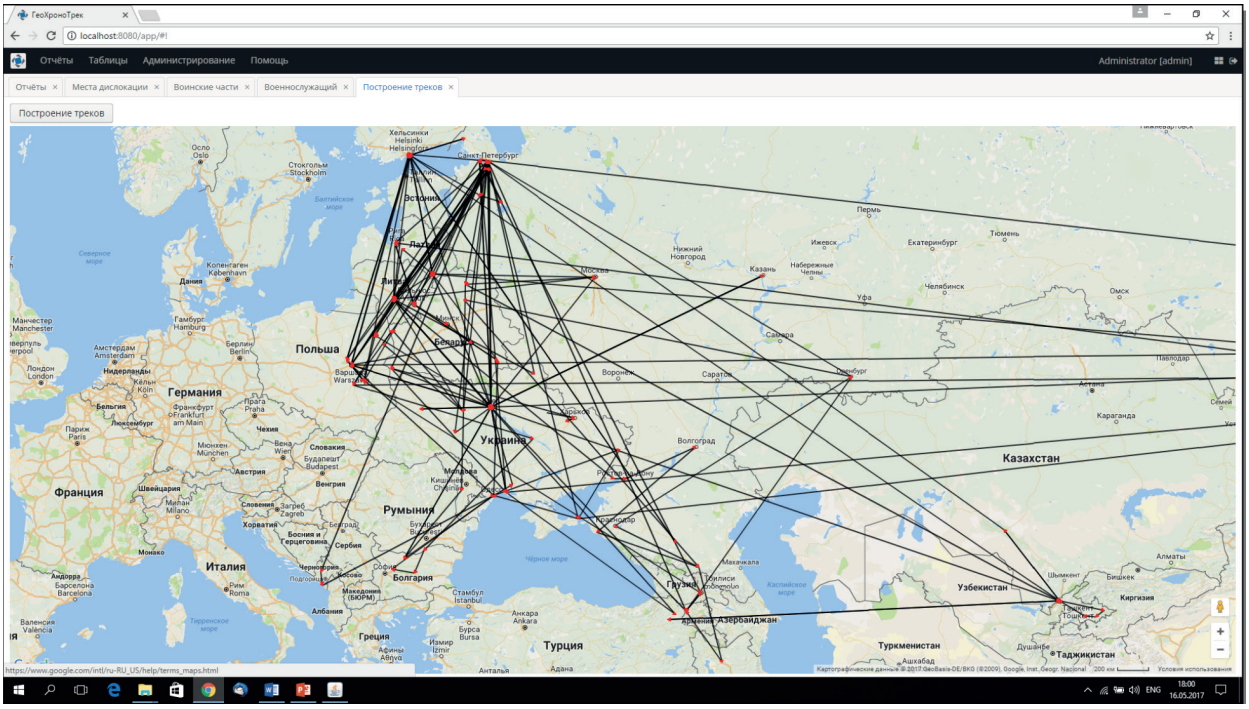


Рис. 1. Пример реализации геохронологического трекинга в ГИС

Граф на изоморфность, к которому определяется подграф в составе базового графа геохронологического трекинга, графически задает соответствующую гипотезу исследования о миграции (перемещениях в географическом пространстве). Например, пусть выдвигается следующая гипотеза: *типовыми (традиционными, наиболее частыми) назначениями (перемещениями по местам прохождения службы) выпускников Санкт-Петербургского морского кадетского корпуса в период с 1870 по 1910 гг. в чинах младших офицеров были назначения либо в штабы флотов, либо в соответствующие крупные корабельные соединения этих флотов. В дальнейшем при переводах штабная или корабельная специализация сохранялась. Допускались назначения из подчиненных корабельных соединений в соответствующие штабы флотов.*

Если в указанный период штабы флотов Российской империи располагались:

– в Санкт-Петербурге — Балтийский флот;

– в Севастополе — Черноморский флот;

– в Порт-Артуре — Тихоокеанский флот,

а местами базирования крупных корабельных соединений для соответствующих флотов были соответственно:

– Гельсингфорс;

– Новороссийск;

– Владивосток,

то интерпретация приведенной гипотезы как ненаправленного графа примет вид, показанный на рис. 2.

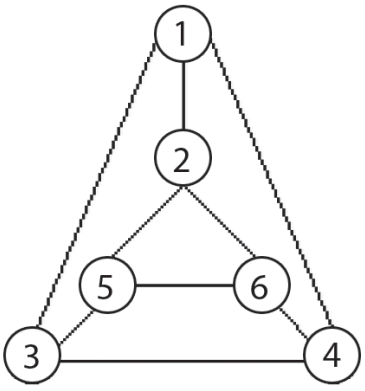


Рис. 2. Пример графа, представляющего исследовательскую гипотезу:
1 — Санкт-Петербург; *2* — Гельсингфорс; *3* — Севастополь;
4 — Порт Артур; *5* — Новороссийск; *6* — Владивосток

Проведенная апробация предлагаемого аналитического аппарата представления и проверки исследовательских гипотез как изоморфного вложения в составе геохронологического трека показала, что графы, описывающие миграционные процессы, могут иметь разнообразную и весьма сложную форму. Так, на рис. 3 приведены некоторые примеры графов, описывающих различные гипотезы — подграфов геохронологического трекинга. В целом этот рисунок позволяет оценить структурную сложность и вариабельность представительских гипотез в виде графов.

Задача распознавания изоморфизма графов является центральной комбинаторной задачей теории графов и имеет корректную интерпретацию в предметной области исторического исследования. На сегодняшний день, согласно [6] – [8], разработан целый ряд эффективных алгоритмов распознавания в составе сложного графа, каким является реальный обобщающий геохронологический трек (рис. 4) подграфа, изоморфного заданному.

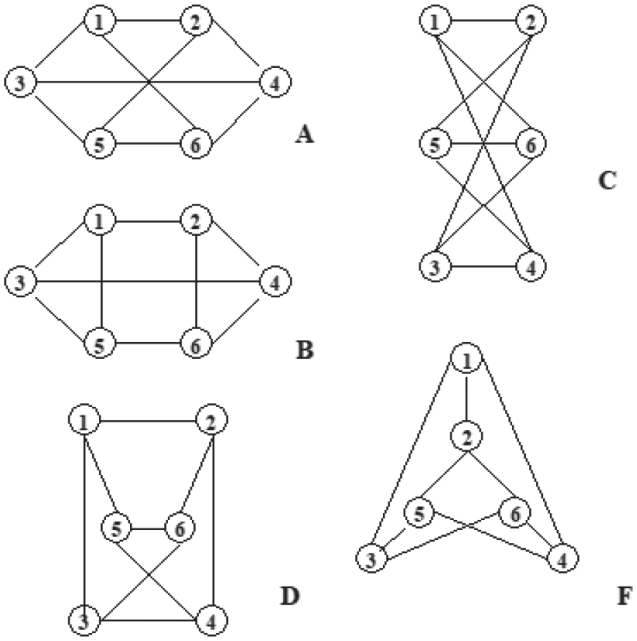


Рис. 3. Варианты графов, описывающих различные гипотезы



Рис. 4. Геохронологический трек
из апробационного исследовательского примера

При этом условно выделяют две основные группы алгоритмов реализации указанного распознавания. Первая группа связана с реализацией принципа иерархического построения неперебо рных алгоритмов, рекурсивно улучшающих свою эффективность в смысле полноты (чувствительности) используемых характеристик вершин и / или ребер, инвариантных относительно изоморфизма графов и называемых инвариантами. Вторая группа алгоритмов связана с реализацией того же принципа иерархического построения алгоритмов на базе обязательной процедуры перебора на одном из этапов поиска изоморфной подстановки. Худшие характеристики имеют алгоритмы, использующие метод полного прямого перебора, они применимы лишь к геохронологическим трекам ограниченной размерности. В целом само решение задачи изоморфного вложения подграфа в состав графа геохронологического трека в программно-алгоритмическом плане является тривиальным и описано в работах [9] – [12].

Таким образом, представление проверки ретроспективных исследовательских гипотез в виде задачи распознавания (поиска) соответствующего изоморфного подграфа позволяет обнаружить и распознать устойчивые структурные вложения в составе соответствующего геохронологического трека из перечня (базы) заранее определённых структур. Иными словами, это представление может быть применено для автоматизированного поиска устойчивых факторов миграционных процессов, специфики перемещений судов или отдельных групп исторических личностей, неочевидных фактов кадровой политикии и др., структура которых заранее известна и описана в виде графов в соответствующей базе данных.

Проведенный анализ применимости предлагаемого метода показал, что использование геохронологического трекинга на базе специализированной ГИС для выявления устойчивых фактов историографического характера позволяет добиться сокращения временных затрат в три-четыре раза, а также ввести количественной меры степени доверия к формулируемым выводам.

Заключение (Conclusion)

Применение компьютерной интерпретации методов теории графов на базе геохронологического трекинга в ходе ретроспективных исследований применения отдельных объектов водного транспорта открывает новые горизонты для применения современных математико-аналитических методов в сфере логистического знания. Перспективными направлениями развития количественных методов в исследованиях данного класса применительно к геохронологическому трекингу является внедрение в соответствующее математическое и программное обеспечение ГИС приложений «мягких» вычислений, аппарата фракталов, методов современной математической топологии, математической теории вероятностей, теории возможностей и др. Внедрение указанных методов и математического аппарата решения исследовательских задач в ГИС является востребованным и рассмотрено в ряде работ, примеры которых приведены в [13] – [17].

Разработка и обоснование конкретизированных интерпретаций указанных методов в предметной области исторических исследований, синтез математических и алгоритмических моделей решения конкретных исследовательских задач составляет суть дальнейших работ и исследований по информационной технологии геохронологического трекинга в ГИС. Вместе с тем уже сегодня можно констатировать широкую перспективу и прикладную применимость данного подхода к развитию программно-информационных инструментов для логистических исследований ретроспективного характера.

Предложенный метод, несомненно, найдет применение в прикладных исследованиях, проводимых в интересах водного (прежде всего, морского) транспорта, поскольку очевидна его широкая применимость для анализа вопросов результативности крюинга экипажей морских судов,

эффективности фрахта кораблей и решения других классов логистических задач современного водного транспорта.

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-07-00127), а также Государственной работы — Проведение фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0073-2018-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивакин Я. А.* Развитие информационной технологии геохронологического трекинга для исторических исследований в ГИС / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Историческая информатика. — 2017. — № 2. — С. 85–94. DOI: 10.7256/2585-7797.2017.2.23083.

2. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / под общ. ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова и д-ра техн. наук В. В. Поповича. — СПб.: Наука, 2013. — 284 с.

3. *Ивакин Я. А.* Геохронологический трекинг — специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. — 2016. — № 1–2 (15–16). — С. 3–11.

4. *Зыков А. А.* Основы теории графов / А. А. Зыков. — М: Вузовская книга, 2004. — 664 с.

5. *Нечепуренко М. И.* Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко, В. К. Попков, С. М. Майнагашев [и др.]. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1990. — 515 с.

6. *Кочура А. Е.* Сингулярные матричные пучки в обобщенной симметричной проблеме собственных значений / А. Е. Кочура, Л. В. Подкользина, Я. А. Ивакин, И. И. Нидзиев // Труды СПИИРАН. — 2013. — № 3 (26). — С. 253–276.

7. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям — диакоптика / Г. Крон. — М.: Наука, 1972. — 544 с.

8. *ДеМарко Т.* Вальсируя с медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Т. ДеМарко, Т. Листер. — М.: Изд. дом DH, 2005. — 196 с.

9. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / под ред. Р. М. Юсупова и В. В. Поповича. — СПб.: Наука, 2013. — 284 с.

10. *Попович В. В.* Системы мониторинга на основе ИГИС / В. В. Попович, П. Н. Волгин, В. И. Гучек, В. И. Ермолаев // Оборонный заказ. — 2012. — № 2 (21). — С. 58–61.

11. *Ермолаев В. И.* Использование геопространственных данных при управлении морской распределенной системой наблюдения / В. И. Ермолаев // Материалы конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). — СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ» Электроприбор», 2014. — С. 270–279.

12. Введение в эргономику / под ред. В. П. Зинченко. — М.: Сов. радио, 1974. — 352 с.

13. *Мирошник И. В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.

14. *Ивакин Я. А.* Обеспечение эффективности геоинформационных систем управления пространственными процессами / Я. А. Ивакин, А. М. Муся // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Системы и средства отображения информации и управления спецтехникой. — 2015. — № 1. — С. 151–159.

15. *Цветков М. В.* Использование интеллектуальной географической информационной системы для выявления опасных ситуаций, связанных с безопасностью судоходства по северному морскому пути / М. В. Цветков, Д. О. Малышева // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): матер. 9-й конф. по проблемам управления. — СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ» Электроприбор». — С. 465–475.

16. *Ermolaev V.* Geoinformational Support of Search-Efforts Distribution Under Changing Environmental Conditions / V. Ermolaev, S. Potapichev // Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). — Springer, Cham, 2018. — Pp. 153–164. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_12.

17. *Ivakin Y. A.* Aggregate indices method for choice of danger prevention strategy in gis-based monitoring system / Y. A. Ivakin, M. V. Tsvetkov // 15th International Multidisciplinary Scientific Gtoconference SGEM2015, Albena, Bulgaria, 18-24.06.2015. — Pp. 441–450.

REFERENCES

1. Ivakin, Yan Al'bertovich, and Sergei Nikolaevich Potapychev. "Razvitie informatsionnoi tekhnologii geokhronologicheskogo trekinga dlya istoricheskikh issledovanii v GIS." *Istoricheskaya informatika* 2 (2017): 85–94. DOI: 10.7256/2585-7797.2017.2.23083.

2. Yusupov, R.M., and V.V. Popovich. *Intellektual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoi obstanovki*. SPb: Nauka, 2013.

3. Ivakin, Yan A., and Sergey N. Potapichev. "Geochronology tracking — specialized GIS-tool for history researches." *Istoricheskaya informatika. Informatsionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyakh i obrazovanii* 1-2 (15-16) (2016): 3–11.

4. Zykov, A.A. *Osnovy teorii grafov*. M: Vuzovskaya kniga, 2004.

5. Nechepurenko, M. I., V. K. Popkov, S. M. Mainagashev, S. B. Kaul', V. A. Proskuryakov, V. A. Kokhov, and A. B. Gryzunov. *Algoritmy i programmy resheniya zadach na grafakh i setyakh*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otdnie, 1990.

6. Kochura, Alexander Eugeniyevich, Ludmila Victorovna Podkolzina, Yan Albertovich Ivakin, and Ivan Ivanovich Nidziev. "Singular matrix bundles in a generalized symmetric problem of eigenvalues." *SPIIRAS Proceedings* 3(26) (2013): 253–276.

7. Kron, G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika*. M.: Nauka, 1972.

8. DeMarko, T., and T. Lister. *Val'siruya s medvedyami. Upravlenie riskami v proektakh po razrabotke programmnogo obespecheniya*. M.: Izdatel'skii dom DH, 2005.

9. Yusupov, R.M., and V.V. Popovich, eds. *Intellektual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoi obstanovki*. SPb.: Nauka, 2013.

10. Popovich, V.V., P.N. Volgin, V.I. Guchek, and V.I. Ermolaev. "Sistemy monitoringa na osnove IGIS." *Oboronnyi zakaz* 2(21) (2012): 58–61.

11. Ermolaev, V.I. "Ispol'zovanie geoprostranstvennykh dannykh pri upravlenii morskoi raspredelennoi sistemoi nablyudeniya." *Materialy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2014)*. SPb.: OAO «Kontsern «TsNII» Elektropribor», 2014. 270–279.

12. Zinchenko, V.P. *Vvedenie v ergonomiku*. M.: Sovetskoe radio, 1974.

13. Miroshnik, I.V., V.O. Nikiforov, and A.L. Fradkov. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami*. SPb.: Izd-vo Nauka, 2000.

14. Ivakin, Ya.A., and A.M. Musya. "Obespechenie effektivnosti geoinformatsionnykh sistem upravleniya prostranstvennymi protsessami." *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Sistemy i sredstva otobrazheniya informatsii i upravleniya spetstekhnikoi* 1 (2015): 151–159.

15. Tsvetkov, M.V., and D.O. Malysheva. "Ispol'zovanie intellektual'noi geograficheskoi informatsionnoi sistemy dlya vyyavleniya opasnykh situatsii, svyazannykh s bezopasnost'yu sudokhodstva po severnomu morskomu puti." *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016): Materialy 9-i konferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: Kontsern "Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut "Elektropribor". 465–475.

16. Ermolaev, Victor, and Sergey Potapichev. "Geoinformational Support of Search-Efforts Distribution Under Changing Environmental Conditions." *Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17)*. Springer, Cham, 2018. 153–164. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9_12.

17. Ivakin, Y.A., and M.V. Tsvetkov. "Aggregate indices method for choice of danger prevention strategy in gis-based monitoring system." *15th International Multidisciplinary Scientific Gtoconference SGEM2015, Albena, Bulgaria,18-24.06.2015*. 441–450.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивакин Ян Альбертович —
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14 линия В. О., д. 39
e-mail: *ivakin@oogis.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivakin, Yan A. —
Dr. of Technical Sciences, professor, leading researcher
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: *ivakin@oogis.ru*

Потапычев Сергей Николаевич —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14 линия В. О., д. 39
e-mail: *potapychev@oogis.ru*

Potapichev, Sergei N. —
PhD, senior researcher
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy
of Sciences
39 14th liniya V. O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: *potapychev@oogis.ru*

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.
Received: March 16, 2018.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 10. № 2

2018 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.04.18. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26,25. Тираж 500 экз. Заказ № 223/2018

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7