

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. № 1**

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2018**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 1. — 252 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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



ISSN 2309-5180



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



## СОДЕРЖАНИЕ

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

- Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н.*  
Бенчмаркинг-показатели в технологическом проектировании  
контейнерных терминалов .....7
- Майоров Н. Н.* Моделирование состояний морского терминала  
на основе дискретизации процессов .....20
- Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Щемелёв В. Л.* Позиционирование спредера  
относительно контейнера с применением ультразвуковых датчиков .....30
- Пишизов А. К.* К теории проектирования и расчета конструкции судовой  
лебедки со встроенным планетарным редуктором .....39
- Андрианов Е. Н., Иванов А. Н., Матвеева Е. В.* Методика проектирования  
схем специальных встроенных планетарных редукторов судовых  
и крановых канатных лебедок .....50
- Зайкин Д. А., Топаж А. Г., Косоротов А. В.* Моделирование возможности  
проведения грузовых операций на платформе «Приразломная»  
по погодным условиям .....62
- Ершов А. А., Петухов П. И., Окунев П. И.* Совершенствование  
спасательных операций при морских и речных авариях путем  
повышения эффективности использования спасательных средств  
и выполнения экологических требований .....78
- Павлова Л. А.* Метод повышения эффективности технологии  
управления перегрузочными процессами рефрижераторных  
контейнерных грузов .....90

### ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ .....97

- Ольховик Е. О., Афонин А. Б., Тезиков А. Л.* Информационная модель  
морских транспортных потоков Северного морского пути .....97
- Минаев О. П.* Повышение эксплуатационной безопасности  
и надежности портовых гидротехнических сооружений  
при разжижении песчаных грунтов оснований новым вибрационным  
способом глубинного уплотнения .....106
- Султанов Т. Т., Тепица Г. М., Саттарова Ш. Ш.* Напряженно-деформи-  
рованное состояние конструкций морского порта «подпорная стенка —  
фундаментная плита — анизотропное основание» .....122
- Моргунов К. П., Рябов Г. Г., Красникова М. В.* Анализ состояния  
конструкций шлюза № 3 Новинкинского гидроузла .....135
- Ксенофонтов Н. М.* Предупреждение реализации деградационных  
отказов элементов механического оборудования водно-транспортных  
гидротехнических сооружений .....149
- Афанасьев А. К., Лебедева М. П., Яцук Ю. В.* Исследование эффектов,  
возникающих в процессе пневматической очистки фильтрующих  
элементов русловых водозаборников .....158

Том 10. № 1

2018

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Гл. редактор**

**С. О. Барышников,**

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

**Зам. гл. редактора**

**А. П. Нырклов,**

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.

*Шаронов А. Ю., Шматков В. А.* Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море ..... 170  
*Стародубцев П. А., Халаев Н. Л., Бакланов Е. Н.* Исследование процесса влияния сейши на акустическое поле замкнутых акваторий мелководных районов ..... 183

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ  
И УСТРОЙСТВА ..... 191**

*Яманин А. И., Жуков В. А., Барышников С. О.* Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма ..... 191  
*Живлюк Г. Е., Петров А. П.* Эксплуатационные особенности систем топливоподачи Common Rail судовых двигателей ..... 201  
*Аблаев А. Р., Аблаев Р. Р.* Анализ тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов типа «жидкость – жидкость» ..... 221

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ..... 229**

*Григорьев А. В., Васильев А. Ю., Зайнуллин Р. Р.* Методика расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с полным распределением электроэнергии на постоянном токе ..... 229

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
НА ТРАНСПОРТЕ ..... 238**

*Соловьев А. В.* Принципы формирования компьютерной модели диагностирования технического состояния судовой энергетической установки ..... 238

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

**Deputy Editor-in-Chief**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION ..... 7

*Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Shcherbakova-Slyusarenko V. N.*  
Benchmarking indicators in technological design of container terminals ..... 7

*Maivorov N. N.* Simulation of states of the marine terminal on the basis of  
discretization of processes ..... 20

*Zub I. V., Ezhov Yu. E., Shchemelev V. L.* The positioning of the spreader  
relative to the container using ultrasonic sensors ..... 30

*Pshizov A. K.* For the theory of designing and calculation construction  
of shipboard hoisting winches with integrated planetary gearbox..... 39

*Andrianov E. N., Ivanov A. N., Matveeva E. V.* Methods of design  
of special integrated planetary gear units of marine and crane drives ..... 50

*Zaykin D. A., Topaj A. G., Kosorotov A. V.* Modeling of cargo operation ability  
on Prirazlomnaya platform according to the weather conditions ..... 62

*Ershov A. A., Petukhov P. I., Okunev P. I.* Improving rescue operations in sea  
and river accidents by improving the efficiency of use of rescue equipment  
and environmental requirements ..... 78

*Pavlova L. A.* Method of increasing the efficiency of technology  
of management of overload processes of refrigerative container cargoes ..... 90

## WATERWAYS AND HYDROGRAPHY ..... 97

*Olhovik E. O., Afonin A. B., Tezikov A. L.* Information model of maritime  
transport flows of the North sea route..... 97

*Minaev O. P.* Improvement of operational safety and reliability  
of port hydrotechnical structures to the liquefaction of sand soils  
of the bases by a new vibration method depth compaction ..... 106

*Sultanov T. T., Tlepiyeva G. M., Sattarova Sh. Sh.* The stress deformed  
state of marine port structures with support wall as fundamental plate..... 122

*Morgunov K. P., Ryabov G. G., Krasnikova M. V.* Analysis  
of construction status of navigable gateway № 3 of Novinkinsky  
hydroelectric complex..... 135

*Ksenofontov N. M.* Warning of realization of degradation failure  
of elements of mechanical equipment of water-transport hydrotechnical  
structures ..... 149

*Afanasev A. K., Lebedeva M. P., Yatsuk Yu. V.* Investigation of effects arising  
in the process of pneumatic cleaning of the raw water intake screens ..... 158

*Sharonov A. Yu., Shmatkov V. A.* The problem of hydrometeorological  
maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea..... 170

*Starodubtsev P. A., Khalaev N. L., Baklanov E. N.* Investigation  
of the process of the seishi influence on the acoustic field  
of closed shallow water areas ..... 183

## SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 191

*Yamanin A. I., Zhukov V. A., Baryshnikov S. O.* Force analysis  
of reciprocating engine using dynamic models of crank mechanism ..... 191

*Zhivljuk G. E., Petrov A. P.* Operating features of marine engines  
with common rail fuel system..... 201

*Ablaev A. R., Ablaev R. R.* Analysis of thermal efficiency of ship heat  
exchangers of type “liquid-liquid” ..... 221

**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

**ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 229**

*Grigoryev A. V., Vasilyev A. Yu., Zaynullin R. R.* Methods of calculation  
of short-circuit currents in shipboard electric power systems  
with total electric power distribution on direct current..... 229

**INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION  
IN TRANSPORT ..... 238**

*Soloviev A. V.* The principles of forming a computer model of diagnosing  
the technical condition of marine power plants ..... 238

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19

## BENCHMARKING INDICATORS IN TECHNOLOGICAL DESIGN OF CONTAINER TERMINALS

**A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, V. N. Shcherbakova-Slyusarenko**

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

*Modern container terminals both located on seaside and deep into the hinterland of cargo catchment areas, form the infrastructure of very complicated goods-conducting system, reflecting many conflicting interests of heterogeneous groups of participants. The studies show that at the stage of taking the main project decisions on design and construction of the terminals, at the phase of the technological design and in the everyday operation activity it is necessary to compare the control and management processes over the products and services generation with those of competing terminals and terminal cargo-conducting systems, thus making the benchmarking approach very important from practical point of view. The problem with this approach is in determination of the necessary and sufficient set of indicators, objectively describing the comparing objects (systems), as well as the criteria and techniques used for this multi-dimensional task. Accordingly, the research focuses on the development of the optimal collection of the key performance indicators for container terminals and the overall goods-conducting super-system helping to achieve operational and strategic goals for the management. The paper includes the authors interpretation of the main terms of this approach, offers the minimal set of KPI and their reference values. It also gives a proof that the KPI approach does not contradict to the analytic approach practiced by professional design and consulting organizations.*

*Keywords:* container terminal, key performance indicators, technological design.

### For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Benchmarking indicators in technological design of container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.

**УДК 656.615**

## БЕНЧМАРКИНГОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

**А. А. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко**

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

*Известно, что в настоящее время контейнерные терминалы, как непосредственно находящиеся в портах, так и в глубине обслуживаемых транспортом территорий, являются элементами взаимозависимой сложной товаропроводящей системы, реализующей комплексы подчас противоречивых интересов многих групп участников транспортного рынка. В статье показано, что в процессе принятия проектных решений о строительстве и оборудовании терминалов на стадии технологического проектирования и в ходе повседневной их эксплуатации при оценке эффективности функционирования отдельных терминалов и товаропроводящей системы в целом целесообразно использование бенчмаркинга, который в общем виде можно интерпретировать как механизм сравнения продуктов, услуг и процессов одного терминала или его функционального элемента с продуктами, услугами или процессами другого терминала или конкурирующей транспортной системы. Показано, что проблемными вопросами при указанном подходе являются определение необходимого и достаточного перечня эксплуатационных и экономических измеряемых показате-*



телей, при сопоставлении которых производится объективное сравнение, а также обоснование методики такого (многокритериального по определению) сравнения. Проведенное исследование направлено на определение для отдельных контейнерных терминалов и всей товаропроводящей системы в целом ключевых показателей эффективности (англ. Key Performance Indicators — KPI), т. е. показателей деятельности подразделений транспортных организаций, которые помогают организации в достижении стратегических и тактических (операционных) целей. Известно, что использование ключевых показателей эффективности даёт организации возможность оценить своё состояние и помочь в оценке реализации стратегии развития. В работе дана авторская интерпретация основных терминов указанного подхода применительно к транспортной отрасли, предложен перечень измеряемых и сопоставимых показателей. Показано, что частные показатели производительности и основанные на них KPI не противоречат детальным расчетам, выполняемым профессиональными проектными и консалтинговыми организациями. Структура статьи включает выделение проблемы, опирающееся на анализ недавних научных работ, её логистическую интерпретацию, обоснование расчетно-аналитических показателей, предложения о применении технологии KPI в технологическом проектировании, сравнение расчетных значений с мировой статистикой и выводы.

**Ключевые слова:** контейнерный терминал, ключевые показатели эффективности, технологическое проектирование.

**Для цитирования:**

Кузнецов А. Л. Бенчмаркинг-показатели в технологическом проектировании контейнерных терминалов / 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. — № 1. — С. 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.

## Введение (Introduction)

В последние годы расширение глобальной сети морских контейнерных терминалов и рост конкуренции в этой сфере транспортных услуг заставляют уделять все большее внимание сравнению операционных и экономических показателей этих опорных элементов современной сети товаропродвижения [1], [2]. Имеется большое количество публикаций, устанавливающих набор значимых показателей, их количественный и качественный анализ, сравнение, рекомендации по их использованию в планировании развития и операционной деятельности как в общетранспортном масштабе [3], [4], так и применительно к отдельным регионам (в работе [5] — для отдельного порта, в работах [6], [7] — для отдельных приморских стран, в работе [8] — для крупного морского бассейна), транспортным схемам (в работе [9] — для магистральных контейнерных линий, в работе [10] — для порта-хаба, в работе [11] — для фидерных направлений, в работе [12] — для комплексной транспортной схемы), транспортным узлам и портам (в работах [13] – [15] рассматривается применение бенчмаркинг-подхода для портовых зон, в работе [16] рассматривается многофакторный анализ для планирования работы порта и портовых зон, в работе [17] приведен подход, основанный на многокритериальном анализе коммерческих и иных рисков портовой деятельности, в работах [18], [19] впервые для российских условий предприняты попытки формирования расширенной измеряемой системы эксплуатационных показателей для контейнерных терминалов, в работе [20] дан прогноз развития многокритериального подхода для оценки эффективности портов). Все это свидетельствует о том, что данная проблема еще не достигла своей парадигмальной формы. Актуальность ее поддерживается тем, что во многом исследование операционных показателей контейнерных терминалов коррелирует с известным в общей логистике подходом к оценке эффективности деятельности предприятий, основанном на бенчмаркинге и ключевых показателях эффективности (KPI — Key Performance Indicators) [21].

В то же время собранные статистические данные сформировали достаточный объем укрупненных показателей, которые с достаточной степенью репрезентативности характеризуют класс морских контейнерных терминалов, что позволяет использовать их в процедурах проектирования, особенно на начальных этапах, для оценки достоверности выходных проектных параметров и установления операционных стандартов в ходе эксплуатации.

Постепенно простота и самоочевидность подхода, основанного на использовании ключевых показателей эффективности работы порта, привела к тому, что он стал широко использоваться

и даже рассматриваться как противоположность расчетно-аналитического подхода, который использовался в практике проектно-конструкторских, консалдинговых и экспертных организаций.

Целью настоящей работы является установление соотношения между этими двумя подходами, которое позволит устранить эту двойственность.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

### Логистическая интерпретация

Ключевым в логистике является понятие объекта, выполняющего те или иные операции. Логистический объект представляет собой любую категорию, изучаемую в избранном аспекте и на выбранном уровне: экономические регионы, государства, транспортные узлы, больницы, банки, предприятия различного профиля, порты, терминалы, отдельные грузовые фронты и многое другое.

Назначением логистических объектов является выполнение определенных операций. Операции, выполняемые логистическим объектом, приводят к появлению продукта. В свою очередь, категория продукта включает в себя широкий спектр возможных результатов операций объекта



Рис. 1. Операция, выполняемая объектом

от производства товаров в чистом виде до оказания услуг тоже в чистом виде. Как правило, любой реальный продукт является некоторой совокупностью свойств как товара, так и услуг.

Условно простейший логистический объект, получающий определенный продукт  $p(t)$  путем выполнения произвольной операции, показан на рис. 1.

Для характеристики операций (в частности, в целях проектирования и сравнения показателей работы) вводится понятие интенсивности операции  $I_{\Delta t}(t)$ , определяемой как количество произведенного продукта за выбранный интервал времени  $\Delta t$  (рис. 2).

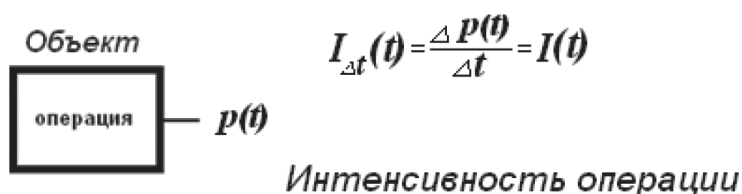


Рис. 2. Интенсивность операции

Интервал  $\Delta t$  в математике можно было бы устремить к нулю, тем самым в пределе перейдя к первой производной от функции получения продукта, т. е. к скорости операций в чистом виде. В практике ведения транспортно-логистического бизнеса интервалы остаются конечными: год, квартал, месяц, неделя, сутки, смена, окно из нескольких часов, час. Поскольку рабочие циклы самого производительного оборудования обычно близки к минуте, меньшие значения интервалов  $\Delta t$  обычно не используются. По сути дела, это приводит к тому, что все рассуждения проводятся не с помощью аппарата дифференциального исчисления, а с помощью конечно-разностных схем, наиболее подходящих для практических целей. С учетом ранее изложенного, для простоты дальнейшего изложения будем опускать символ  $\Delta t$  в записи интенсивности  $I_{\Delta t}(t)$  и использовать вместо этого обозначение  $I(t)$ , подразумевая то или иное конкретное выбранное значение этого интервала.

Интенсивность операции является функцией, изменяющейся во времени. Ранее отмечалось, что, по сути, она является скоростью операции, конкретное значение которой в данный момент времени называется текущей интенсивностью. Максимально возможная интенсивность операции  $I^{\max}$  называется ее мощностью. Интенсивность, усредненная за некоторый промежуток времени  $T$ , называется средней интенсивностью за этот период, которую обозначим как  $I_T$ . Напомним,

что средней интенсивностью является такое постоянное ее значение, которое за установленный интервал времени дает то же общее количество продукта, что и меняющаяся за это время текущая интенсивность. Указанные понятия поясняет рис. 3.

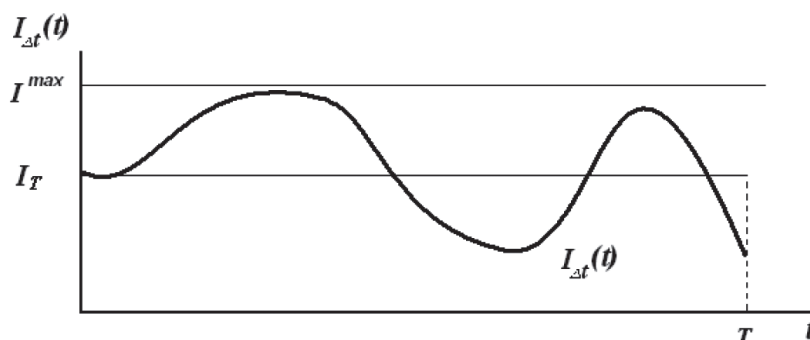


Рис. 3. Текущая, максимальная и средняя интенсивность операции

Степень использования потенциальной возможности операции характеризует относительная величина — *эффективность операции*, определяемая как отношение наблюдаемой интенсивности операции к ее мощности. Соответственно можно говорить о *текущей эффективности* операции  $I(t)/I^{\max}$  и *средней эффективности* ее  $I_T/I^{\max}$  за некоторый период. В большинстве случаев текущая эффективность имеет более привычное название — *текущее использование мощности*.

При выполнении операций, в результате которых получается продукт, объект потребляет (расходует, использует, привлекает) некоторые *ресурсы*. В обобщенном виде объект  $O$ , кото-



Рис. 4. Ресурс выполнения операции

рый производит некоторый продукт  $p(t)$  и потребляет для этого ресурс  $r(t)$ , показан на рис. 4. Например, если исследуемым объектом выбран причал контейнерного терминала, то его продуктом может служить количество переваленных через него контейнеров. Ресурсом в данном примере могут служить работающие на причальном фронте краны.

Для характеристики степени использования ресурса при выполнении операции получения продукта вводится понятие *производительности ресурса*  $P_{\Delta t}(t)$ , определяемое как отношение количества произведенного продукта за интервал  $\Delta t$  к количеству использованного в этот период ресурса (рис. 5).

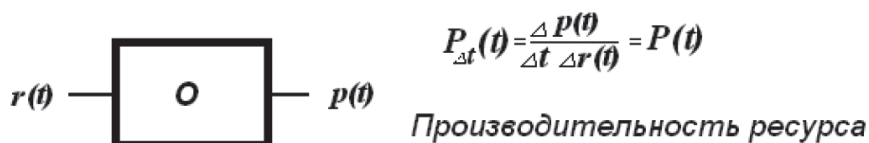


Рис. 5. Производительность ресурса

Аналогично ранее изложенному, в этом случае вводится понятие *максимальной производительности*, или *мощности использования ресурса*  $P^{\max}$ , и его *средней производительности*  $P_T$ . С учетом этого также можно говорить о *текущем использовании* максимальной производительности  $P(t)/P^{\max}$  и *средней эффективности* ее  $P_T/P^{\max}$ .

Как правило, интенсивность (производительность) операций невозможно постоянно поддерживать на максимальном уровне, поскольку это требует выполнения многих внешних условий (требований постоянной доступности операционных ресурсов, непрерывности их восполнения, требований к качеству выполнения операций, отсутствию помех для ее выполнения и т. д.). Интенсивность операции, которая поддерживается при соблюдении дополнительных внешних условий



для ее выполнения, называется *пропускной способностью*. Например, пропускной способностью въездных ворот терминала с мощностью операций 100 авт./ч может являться интенсивность пропуска в 80 авт./ч, если это не приводит к образованию слишком длинной очереди в ожидании на обслуживание. Длина очереди в ожидании обслуживания здесь определяет его качество и может быть ограничена числом парковочных слотов. Иными словами, объект способен пропустить 100 авт./ч, но за счет неограниченной очереди (мощность). При ограничениях на качество обслуживания (в данном примере длина очереди), объект способен пропустить 80 авт./ч (пропускная способность).

В общем случае сколько-нибудь реальный исследуемый логистический объект одновременно выполняет несколько операций, производя в результате этого несколько продуктов. При этом в операции вовлекается определенное множество ресурсов (рис. 6).

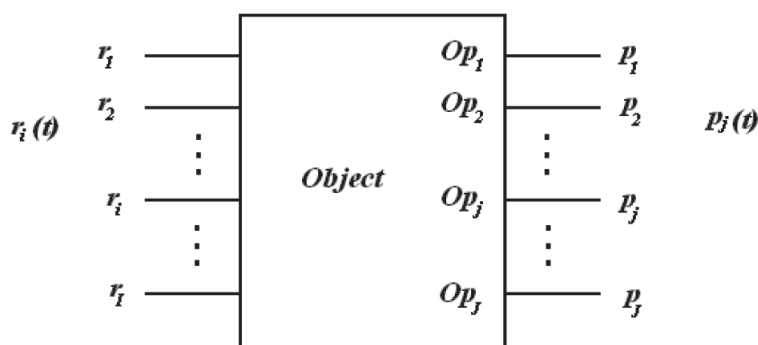


Рис. 6. Операции, продукты и ресурсы объекта

В отношении ресурсов в данном случае приходится говорить об их *частичной производительности*, характеризующей количество конкретного продукта, получаемого на единицу конкретного используемого ресурса (рис. 7).

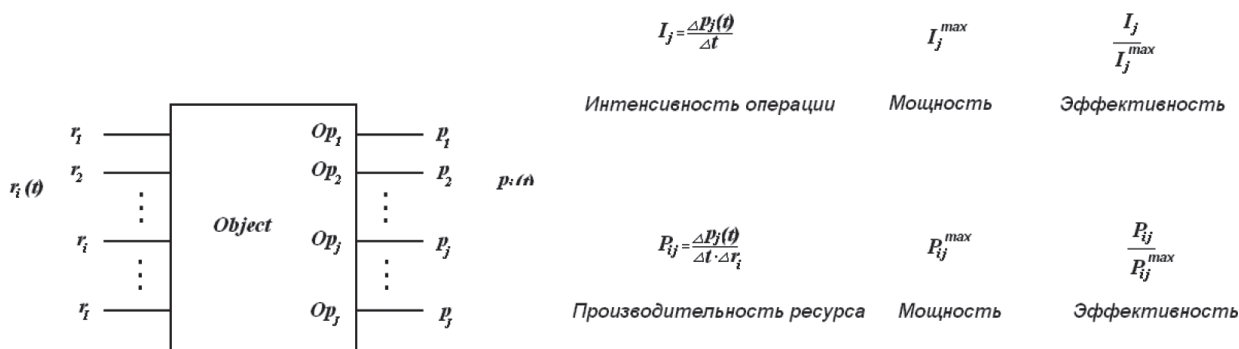


Рис. 7. Интенсивность операций и частичные производительности

Например, для рассматриваемого морского терминала примером частичной производительности будет являться производительность одного крана. Поскольку морской фронт и площадь терминала могут рассматриваться так же, как и его ресурсы, можно говорить о частичной производительности погонного метра причальной стенки (напряженность грузовой работы через причал, измеряемая количеством контейнеров на погонный метр длины причальной стенки) или о частичной производительности квадратного метра площади терминала. Данные характеристики в настоящее время широко используются для сравнительного анализа эксплуатационной деятельности различных портов и терминалов. Пример типовых значений ключевых показателей работы контейнерного терминала в их логистической интерпретации приведен на рис. 8.

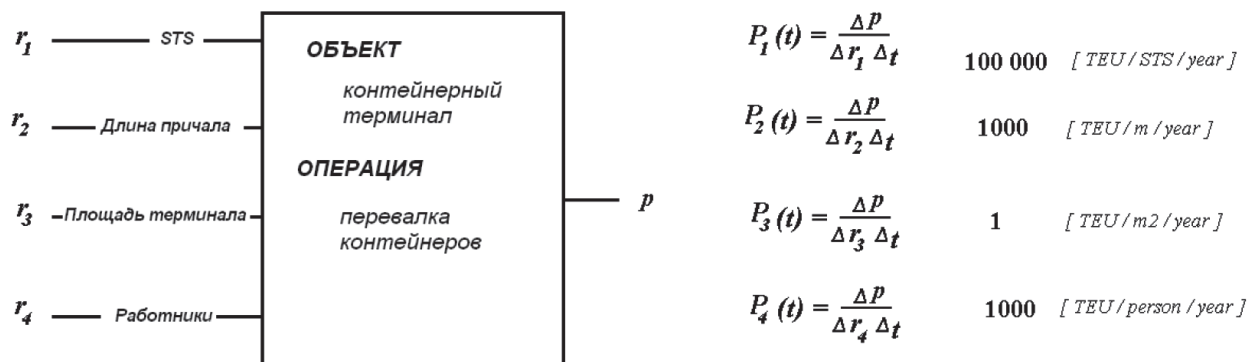


Рис. 8. Частичная производительность контейнерного терминала

Использование типовых для той или иной отрасли или производственной деятельности значений наиболее важных и характерных показателей в современной логистике называется *бенчмаркингом*. В ряде случаев используется вариант подхода, который имеет название *ключевых показателей эффективности* (KPI). Реализация этого подхода при достаточно полной статистике, обширной базе и определенных навыках интерпретации данных с учетом различия операционных условий позволяет получать вполне информативные первичные оценки проектируемого, модернизируемого или управляемого объекта логистической деятельности.

#### Расчетно-аналитические показатели

Методики расчетов операционных показателей в зарубежной практике являются интеллектуальной собственностью консалтинговых компаний и составляют конфиденциальные сведения. В отечественной практике технологические расчеты подобного рода регламентируются государственными и ведомственными нормами [23], в которых излишне подробно и неясно излагаются методы, которые современная информатика называет *потокowymi вычислениями*. В то же время сама логика расчетов достаточно проста и в большинстве практических случаев получаемые различными проектантами значения показателей оказываются разумно близкими.

В таблице приведены схемы расчетов основных показателей с комментариями, делающими ее очевидной, и указаны аналитические значения частных производительностей ресурсов.

#### Расчет технологических параметров и показателей эффективности

| Показатель                     | Условное обозначение | Формула                                       | Значение  | Размерность |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------|-------------|
| Годовой грузооборот            | $Q$                  | —                                             | 1 000 000 | TEU/г       |
| Вместимость судна              | $V$                  | —                                             | 4 300     | TEU         |
| Размер судозахода              | $k_1$                | —                                             | 0,25      |             |
| Вклад судна в грузооборот      | $v$                  | $v = 2Vk_1$                                   | 2 150     | TEU         |
| Число судозаходов              | $N_{\text{суд}}$     | $N_{\text{суд}} = Q/v$                        | 465       | суд/г       |
| Число кранов на судно          | $n_{\text{кр}}$      | —                                             | 3         | STS/суд     |
| Производительность кранов      | $P_{\text{кр}}$      | —                                             | 25        | TEU/ч       |
| Производительность причала     | $P_{\text{пр}}$      | $P_{\text{пр}} = P_{\text{кр}} n_{\text{кр}}$ | 75        | TEU/ч       |
| Длительность ПРР               | $t_{\text{ПРР}}$     | $t_{\text{ПРР}} = v/P_{\text{пр}}$            | 29        | ч           |
| Время вспомогательных операций | $t_{\text{всп}}$     | —                                             | 4         | ч           |
| Время обработки судна          | $T$                  | $T = t_{\text{всп}} + t_{\text{ПРР}}$         | 33        | ч           |

|                                   |                   |                                                  |         |                       |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------|---------|-----------------------|
| Требуемый бюджет времени          | $TQ$              | $TQ = TN_{\text{суд}}$                           | 15 194  | ч                     |
| Бюджет астрономического времени   | $T_{\text{астр}}$ | —                                                | 8 760   | ч                     |
| Потери по метеоусловиям           | $k_{\text{мет}}$  | —                                                | 0,90    | %                     |
| Бюджет времени причала            | $T_{\text{пр}}$   | $T_{\text{пр}} = T_{\text{астр}} k_{\text{мет}}$ | 7 884   | ч                     |
| Расчетное число причалов          | $N_{\text{расч}}$ | $N_{\text{расч}} = TQ/T_{\text{пр}}$             | 1,93    | Ед.                   |
| Проектное число причалов          | $N_{\text{пр}}$   | —                                                | 3       | Ед.                   |
| Занятость причалов                | $k_{\text{зан}}$  | $k_{\text{зан}} = N_{\text{расч}}/N_{\text{пр}}$ | 0,64    |                       |
| Длина причала                     | $L_{\text{пр}}$   | —                                                | 330     | м                     |
| Длина МГФ                         | $L_{\text{МГФ}}$  | $L_{\text{МГФ}} = L_{\text{пр}} N_{\text{пр}}$   | 990     | м                     |
| Производительность причала        | $P_1$             | $P_1 = Q/L_{\text{МГФ}}$                         | 1 010   | TEU/м/г               |
| Производительность STS            | $P_2$             | $P_2 = Q/N_{\text{пр}}/n_{\text{кр}}$            | 111 111 | TEU/STS/г             |
| Средний срок хранения             | $T_{\text{хр}}$   | —                                                | 7       | сут                   |
| Интервал между судозаходами       | $T_{\text{суд}}$  | $T_{\text{суд}} = 365/N_{\text{суд}}$            | 0,78    | сут                   |
| Емкость склада                    | E                 | $E = vT_{\text{хр}}/T_{\text{суд}}$              | 19 178  | TEU                   |
|                                   | E                 | $E = QT_{\text{хр}}/365$                         | 19 178  | TEU                   |
| Высота складирования              | $h$               | —                                                | 3       | ярус                  |
| Площадь склада TGS                | $s$               | $s = Eh$                                         | 7 671   | TGS                   |
| «Чистая» площадь TGS              | $s_0$             | —                                                | 15      | м <sup>2</sup>        |
| Фактор технологической системы    | $k_2$             | —                                                | 3,00    |                       |
| «Грязная» площадь TGS             | $S_0$             | $S_0 = s_0 k_2$                                  | 45      | м <sup>2</sup>        |
| «Чистая» площадь основания склада | $S_{\text{CY}}$   | $S_{\text{CY}} = S_0 s$                          | 345 205 | м <sup>2</sup>        |
| Коэффициент формы склада          | $k_3$             | —                                                | 1,50    |                       |
| Грязная площадь склада            | $S_{\text{скл}}$  | $S_{\text{скл}} = S_{\text{CY}} k_3$             | 517 808 | м <sup>2</sup>        |
| Доля склада в площади порта       | $k_4$             | —                                                | 1,50    |                       |
| Площадь терминала                 | $S$               | $S = S_{\text{скл}} k_4$                         | 776 712 | м <sup>2</sup>        |
| Производительность площади        | $P_3$             | $P_3 = Q/S$                                      | 1       | TEU/м <sup>2</sup> /г |

Таким образом, на основе анализа результатов можно сделать вывод о том, что частные показатели производительности и основанные на них KPI не противоречат детальным расчетам, выполняемым профессиональными проектными и консалтинговыми организациями. Безусловно, детальные технологические расчеты содержат еще много иных важных параметров, без которых невозможно построить и эксплуатировать реальный контейнерный порт или терминал, но подход на основе бенчмаркинг-показателей и не претендует на то, чтобы заменить рабочее проектирование.

### **Применение технологии KPI в технологическом проектировании**

В практике технологического проектирования портов и грузовых терминалов можно выделить две постановки проектной задачи: *прямую* и *обратную*. Прямая задача проектирования состоит в создании инфраструктуры и определении ее технологических параметров, обеспечивающих обработку расчетного грузопотока с заданной структурой и объемом, обратная задача проектирования заключается в оценке грузопотока, который может быть обработан заданной

инфраструктурой терминала с более или менее свободными значениями технологических параметров.

Рассмотренные ранее KPI делают получение первоначальных оценок параметров контейнерного терминала в прямой постановке проектной задачи очень простым. Действительно, если необходимо построить морской контейнерный терминал с годовым грузооборотом, например, в 600 000 TEU, то бенчмаркинг-показатели (см. рис. 8) указывают на то, что необходимо иметь причальный фронт общей длиной около 600 м, приобрести шесть причальных перегружателей, располагать общей площадью прибрежной территории в 60 га и иметь потенциальный ресурс рабочей силы, составляющий 600 подготовленных работников различной квалификации.

Другой пример дает представление о возможностях указанного подхода при обратной постановке задачи проектирования. Пусть, например, в распоряжении инвестора имеется участок береговой линии погонной длиной 1000 м и прилегающая к нему территория площадью 50 га, расположенная на расстоянии 500 км от перегруженного порта в центре крупного города. Имеет ли смысл начинать проект переноса туда контейнерного терминала? Рассмотренные выше показатели позволяют оценить пропускную способность морского грузового фронта на уровне 1 млн TEU, но доступная для развития площадь терминала ограничивает грузопоток до уровня 500 тыс. TEU. Кроме того, для деятельности терминала необходимо будет изыскать ресурс рабочей силы как минимум в 500 человек, что может оказаться проблематичным для подобного расположения порта.

Безусловно, использовать подобные подходы в разделах реальной проектной документации даже на предварительных этапах было бы весьма легкомысленно. В то же время, опираться на подобные бенчмаркинг-показатели при принятии решений о начале проекта и контроле за полученными в ходе проектных процедур параметрами, безусловно, служит примером «хорошей морской практики». Иными словами, указанный подход нельзя ни переоценивать, ни недооценивать: он составляет лишь один из инструментов обширного набора проектных методов является простым и надежным.

#### ***Сравнение расчетных значений с мировой статистикой***

В литературе данные о значениях KPI, характеризующих операционные аспекты деятельности контейнерных терминалов по всему миру и в отдельных его регионах, представлены достаточно полно. Наиболее полная выборка приведена в работе [22], примеры данных из которой представлены на рис. 9.

а)

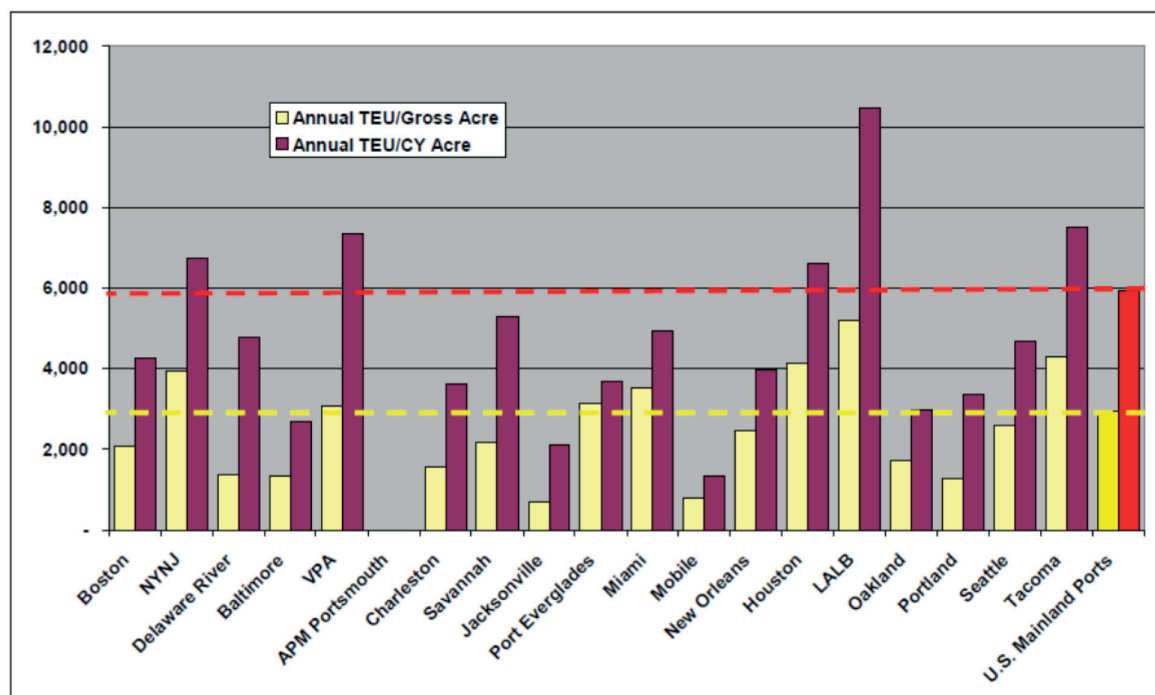


Рис. 9. Годовая производительность площади (а) и причального перегружателя (б) (Начало)

б)

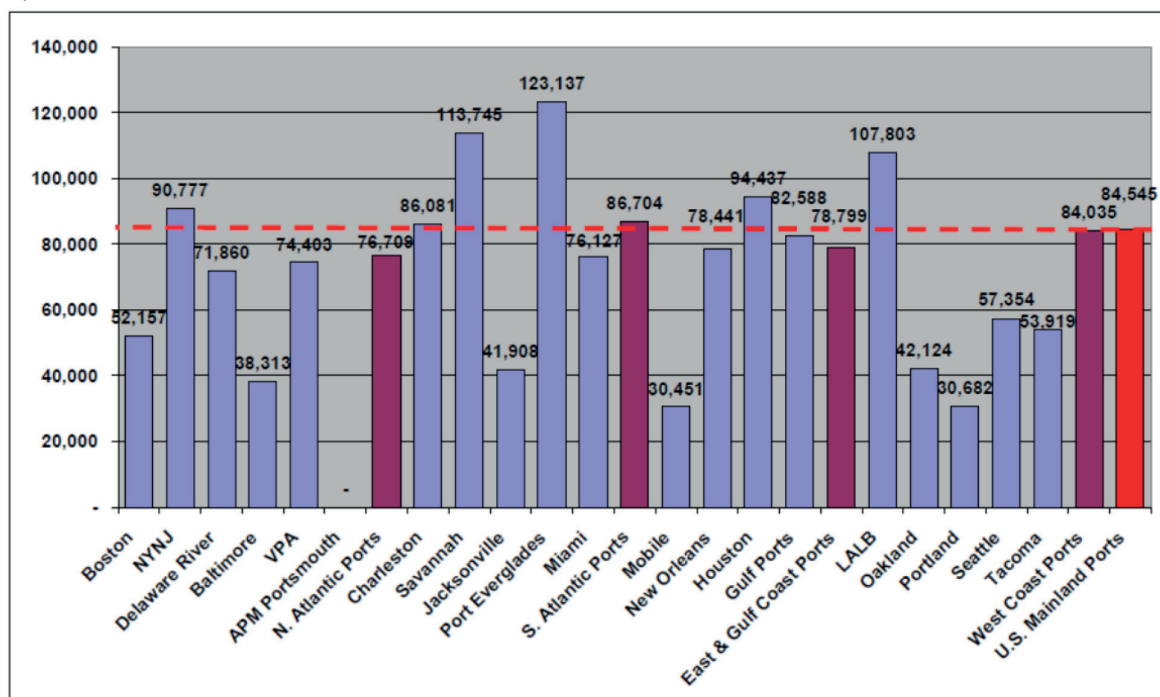
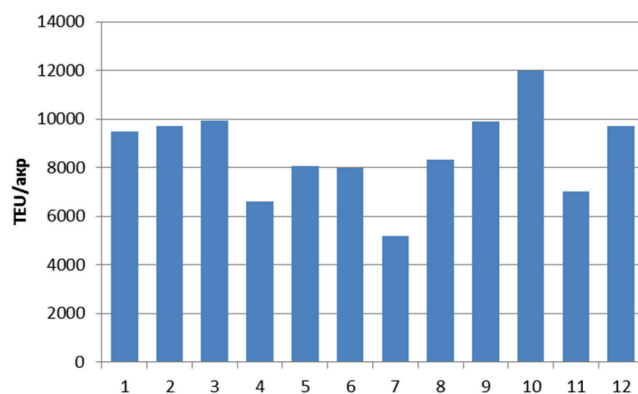


Рис. 9. Годовая производительность площади (а) и причального перегружателя (б) (Окончание)

На рис. 10 приведены результаты двенадцати статистических испытаний, т. е. расчетов, аналогичных приведенным в таблице, в которые внесена статистическая погрешность по методу Монте-Карло.

а)



б)

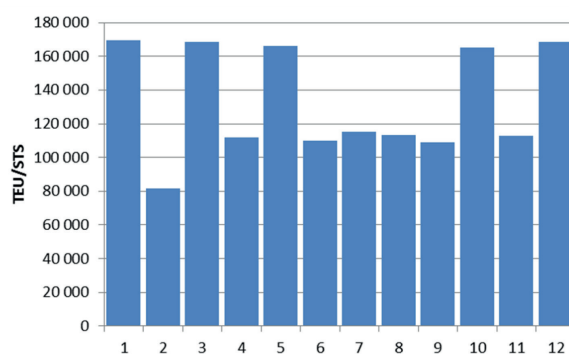


Рис. 10. Диаграммы годовых производительностей площади (а) и причального перегружателя (б), моделированных методом Монте-Карло

Сравнение рис. 9 и 10 позволяет сделать вывод о том, что получаемые при сборе статистических данных показатели по вероятности сходятся к расчетным значениям, которые дают расчетно-аналитические методы с применением технологии статистического моделирования.

### Выводы (Conclusions)

1. В практике современного транспортного бизнеса имеются два диаметрально противоположных подхода к проектированию, управлению и оценке результатов деятельности контейнерных терминалов: расчетно-аналитический подход, использующий методику потоковых вычислений, и подход на основе укрупненных показателей, использующих идеологию KPI.

2. В профессиональной литературе и практике проектирования транспортных терминалов два этих подхода рассматриваются как взаимоисключающие и имеющие различные целевые группы пользователей: ключевые показатели эффективности обычно используются как формат сбора статистических параметров эксплуатации терминала в целях управления, в то время как расчетно-аналитические показатели составляют целевые значения проектов на этапе строительства и ввода в строй.

3. Проведенные в статье рассуждения устанавливают органичную связь обоих этих расчетных методик, доказывают совпадение получаемых с их помощью результатов на ранних стадиях технологического проектирования, определяют границы их применимости и возможности взаимосвязанного использования для повышения достоверности результатов проектирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gerbec M. Safety related key performance indicators for securing long-term business development – A case study / M. Gerbec, B. Kontić // *Safety Science*. — 2017. — Vol. 98. — Pp. 77–88. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.06.004.
2. Sangwan K. S. Key Activities, Decision Variables and Performance Indicators of Reverse Logistics / K. S. Sangwan // *Procedia CIRP*. — 2017. — Vol. 61. — Pp. 257–262. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.185.
3. Vaghi C. Costs and Benefits of Speeding up Reporting Formalities in Maritime Transport / C. Vaghi, L. Lucietti // *Transportation Research Procedia*. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 213–222. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.057.
4. Li N. Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative / N. Li, G. Chen, K. Govindan, Z. Jin // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2016. DOI: 10.1016/j.trd.2015.12.014.
5. Gogas M. Assessing the performance of intermodal city logistics terminals in Thessaloniki / M. Gogas, G. Adamos, E. Nathanail // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — Vol. 24. — Pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.061.
6. Dumitrache C. Improving Key Performance Indicators in Romanian Large Transport Companies / C. Dumitrache, O. Kherbash, M. L. Mocan // *Procedia–Social and Behavioral Sciences*. — 2016. — Vol. 221. — Pp. 211–217. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.108.
7. Eshtaiwi M. Determination of key performance indicators for measuring airport success: A case study in Libya / M. Eshtaiwi, I. Badi, A. Abdulshahed, T. E. Erkan // *Journal of Air Transport Management*. — 2017. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.12.004.
8. Morales-Fusco P. Assessing Customs Performance in the Mediterranean Ports. KPI Selection and Best Practices Identification as Part of the MEDNET Project / P. Morales-Fusco, S. Saurí, A. M. Lekka, I. Karousos // *Transportation Research Procedia*. — 2016. — Vol. 18. — Pp. 374–383. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.049.
9. Song D. P. Multi-objective optimization for planning liner shipping service with uncertain port times / D. P. Song, D. Li, P. Drake // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2015. — Vol. 84. — Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.001.
10. Cheng M. C. B. An integrative approach in measuring hub-port supply chain performance: Potential contributions of a logistics and transport data exchange platform / M. C. B. Cheng, J. J. Wang // *Case Studies on Transport Policy*. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 150–160. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.03.001.
11. Santini A. A branch-and-price approach to the feeder network design problem / A. Santini, C. E. M. Plum, S. Ropke // *European Journal of Operational Research*. — 2018. — Vol. 264. — Is. 2. — Pp. 607–622. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.063.



12. Woxenius J. Directness as a key performance indicator for freight transport chains / J. Woxenius // *Research in Transportation Economics*. — 2012. — Vol. 36. — Is. 1. — Pp. 63–72. DOI: 10.1016/j.retrec.2012.03.007.
13. Seguí X. New environmental performance baseline for inland ports: A benchmark for the European inland port sector / X. Seguí, M. Puig, E. Quintieri, C. Wooldridge, R. M. Darbra // *Environmental Science & Policy*. — 2016. — Vol. 58. — Pp. 29–40. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.12.014.
14. Antão P. Identification of Occupational Health, Safety, Security (OHSS) and Environmental Performance Indicators in port areas / P. Antão, M. Calderón, M. Puig, A. Michail, C. Wooldridge, R. M. Darbra // *Safety Science*. — 2016. — Vol. 85. — Pp. 266–275. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.12.031.
15. Puig M. Tool for the identification and implementation of Environmental Indicators in Ports (TEIP) / M. Puig, A. Pla, X. Seguí, R. M. Darbra // *Ocean & Coastal Management*. — 2017. — Vol. 140. — Pp. 34–45. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.02.017.
16. Schipper C. A. A sustainability assessment of ports and port-city plans: Comparing ambitions with achievements / C. A. Schipper, H. Vreugdenhil, M. P. C. de Jong // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2017. — Vol. 57. — Pp. 84–111. DOI: 10.1016/j.trd.2017.08.017.
17. Yang Z. A new risk quantification approach in port facility security assessment / Z. Yang, A. K. Y. Ng, J. Wang // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. — 2014. — Vol. 59. — Pp. 72–90. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.025.
18. 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.
19. Кузнецов А. Л. Оценка требований к оборудованию в контейнерных сетях доставки / 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. — № 2. — С. 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-229-236.
20. Tran H. A Quality Management Framework for Seaports in their Supply Chains in the 21st Century / H. Tran, S. Cahoon, S. L. Chen // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2011. — Vol. 27. — Is. 3. — Pp. 363–386. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80017-9.
21. Stricker N. Considering Interdependencies of KPIs – Possible Resource Efficiency and Effectiveness Improvements / N. Stricker, M. Micali, D. Dornfeld, G. Lanza // *Procedia Manufacturing*. — 2017. — Vol. 8. — Pp. 300–307. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.038.
22. Improving marine container terminal productivity: development of productivity measures, proposed services data, and initial collection of data from proposed sources. — Moraga, CA: The TigodaGrop, Inc., 2010. — 136 p.
23. РД 31.3.01.01-93 Руководство по технологическому проектированию морских портов. Минтранс РФ, 15.11.1993.

## REFERENCES

1. Gerbec, Marko, and Branko Kontić. “Safety related key performance indicators for securing long-term business development—A case study.” *Safety Science* 98 (2017): 77–88. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.06.004.
2. Sangwan, Kuldeep Singh. “Key Activities, Decision Variables and Performance Indicators of Reverse Logistics.” *Procedia CIRP* 61 (2017): 257–262. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.185.
3. Vaghi, Carlo, and Luca Lucietti. “Costs and Benefits of Speeding up Reporting Formalities in Maritime Transport.” *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 213–222. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.057.
4. Li, Na, Gang Chen, Kannan Govindan, and Zhihong Jin. “Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016.
5. Gogas, Michael, Giannis Adamos, and Eftihia Nathanail. “Assessing the performance of intermodal city logistics terminals in Thessaloniki.” *Transportation Research Procedia* 24 (2017): 17–24. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.061.
6. Dumitrache, Cristian, Oualid Kherbash, and Marian Liviu Mocan. “Improving Key Performance Indicators in Romanian Large Transport Companies.” *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 221 (2016): 211–217. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.108.

7. Eshtaiwi, Mohamed, Ibrahim Badi, Ali Abdulshahed, and Turan Erman Erkan. "Determination of key performance indicators for measuring airport success: A case study in Libya." *Journal of Air Transport Management* (2017). DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.12.004.
8. Morales-Fusco Pau, Sergi Saurí, Anna Maria Lekka, and Iosif Karousos. "Assessing Customs Performance in the Mediterranean Ports. KPI Selection and Best Practices Identification as Part of the MEDNET Project." *Transportation Research Procedia* 18 (2016): 374–383. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.049.
9. Song, Dong-Ping, Dong Li, and Paul Drake. "Multi-objective optimization for planning liner shipping service with uncertain port times." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 84 (2015): 1–22. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.001.
10. Cheng, Michael C.B., and James J. Wang. "An integrative approach in measuring hub-port supply chain performance: Potential contributions of a logistics and transport data exchange platform." *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 150–160. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.03.001.
11. Santini, Alberto, Christian E.M. Plum, and Stefan Ropke. "A branch-and-price approach to the feeder network design problem." *European Journal of Operational Research* 264.2 (2018): 607–622. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.063.
12. Woxenius, Johan. "Directness as a key performance indicator for freight transport chains." *Research in transportation economics* 36.1 (2012): 63–72. DOI: 10.1016/j.retrec.2012.03.007.
13. Seguí, Xavier, Martí Puig, Eugenio Quintieri, Chris Wooldridge, and Rosa Mari Darbra. "New environmental performance baseline for inland ports: a benchmark for the European inland port sector." *Environmental Science & Policy* 58 (2016): 29–40. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.12.014.
14. Antão, Pedro, Marlene Calderón, Martí Puig, Antonis Michail, Chris Wooldridge, and R.M. Darbra. "Identification of Occupational Health, Safety, Security (OHSS) and Environmental performance indicators in port areas." *Safety science* 85 (2016): 266–275. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.12.031.
15. Puig, Martí, Arnau Pla, Xavier Seguí, and Rosa Mari Darbra. "Tool for the identification and implementation of Environmental Indicators in Ports (TEIP)." *Ocean & Coastal Management* 140 (2017): 34–45. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.02.017.
16. Schipper, C. A., H. Vreugdenhil, and M. P. C. de Jong. "A sustainability assessment of ports and port-city plans: Comparing ambitions with achievements." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 57 (2017): 84–111. DOI: 10.1016/j.trd.2017.08.017.
17. Yang, Zaili, Adolf K.Y. Ng, and Jin Wang. "A new risk quantification approach in port facility security assessment." *Transportation research part A: policy and practice* 59 (2014): 72–90. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.025.
18. 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.
19. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Assessment of the equipment demand in container supply chains." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-229-236.
20. Tran, Hai, Stephen Cahoon, and Shu-Ling Chen. "A Quality Management Framework for Seaports in their Supply Chains in the 21st Century." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 27.3 (2011): 363–386. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80017-9.
21. Stricker, N., M. Micali, D. Dornfeld, and G. Lanza. "Considering Interdependencies of KPIs—Possible Resource Efficiency and Effectiveness Improvements." *Procedia Manufacturing* 8 (2017): 300–307. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.038.
22. *Improving marine container terminal productivity: development of productivity measures, proposed services data, and initial collection of data from proposed sources*. Moraga, CA: The TigodaGrop, Inc., 2010.
23. RD 31.3.01.01-93 Instructions on technological design of sea ports. Russian MoT, 15.11.1993.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кузнецов Александр Львович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru), [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto:kaf_pgt@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kuznetsov, Aleksandr L.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru), [kaf\\_pgt@gumrf.ru](mailto: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: [a.v.kirichenko@mail.ru](mailto:a.v.kirichenko@mail.ru),  
[KirichenkoAV@gumrf.ru](mailto: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](mailto:victorysch@mail.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: [a.v.kirichenko@mail.ru](mailto:a.v.kirichenko@mail.ru),  
[KirichenkoAV@gumrf.ru](mailto:KirichenkoAV@gumrf.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](mailto:victorysch@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 16 января 2018 г.*

*Received: January 16, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-20-29

## SIMULATION OF STATES OF THE MARINE TERMINAL ON THE BASIS OF DISCRETIZATION OF PROCESSES

**N. N. Maiorov**

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

*The paper offers the proposals for studying the states of achieving the required levels of ports and terminals depending on the influence of the external environment. The relevance of this is justified by the performed analysis of the indicators and the use in the statistical information of a set of data characterizing the different operating states of the terminal. The basis of the proposals is the statement about the uneven load of individual sections of ports and, as a consequence, the necessity to select the states of their operation and perform their further analysis using discretization processes. Based on the model and subsequent analysis, the decision-maker can more accurately determine the reasons for failure to achieve certain port and terminal performance. This approach is based on Kotel'nikov's theorem for finding discrete states for any given sequence of states. The data on the work of the passenger port "Morskoy Fasad" were used to verify the data. The proposed approach to the study of states will be useful both at the stage of a feasibility study, both as a definition of the criteria for achieving the required level, and in the process of operational monitoring. The conducted research can additionally be used to generate a sample of certain discrete values for the subsequent analysis. With this approach, the operation of the port system is represented as a set of discrete values corresponding to certain levels. The decision maker forms a different set of relationships between the desired states of the development of the port system and the conditions for achieving them, and only after carrying out the analysis proposed in the article can additional adjustments be made to the objective functions of the port systems. The accuracy of this model is justified in the article and it is proposed to supplement the model with a probability function that describes the influence of the external environment. The proposed model can be used both as a separate state analysis tool and used in parallel with performing operational simulation of the terminal operation.*

*Keywords: performance indicators, port states, discretization, forecasting, finding the states of the system.*

### **For citation:**

Maiorov, Nikolai N. "Simulation of states of the marine terminal on the basis of discretization of processes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-20-29.

**УДК 65.012.1, 656.072**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ

**Н. Н. Майоров**

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Статья содержит предложения по исследованию состояний достижения необходимых уровней портов и терминалов в зависимости от влияния внешней среды. Актуальность этого обоснована выполненным анализом показателей и использованием в статистической информации набора данных, характеризующих различные состояния работы терминала. Основу предложений составляет утверждение о неравномерности загрузки отдельных участков портов и, как следствие, необходимостью проведения отбора состояний их работы и выполнения дальнейшего анализа с использованием процессов дискретизации. На основе приведенной модели и последующего анализа лица, принимающего решение, может более точно определять причины недостижения определенных показателей работы портов и терминалов. В основе данного подхода предлагается использовать теорему Котельникова для нахождения дискретных состояний при любой имеющейся последовательности состояний. В качестве проверки данных использованы данные по работе пассажирского порта «Морской фасад». Предлагаемый подход к исследованию*

*состояний будет полезен как на стадии технико-экономического обоснования в качестве определения критериев достижения требуемого уровня, так и в процессе операционного мониторинга. Проведенное исследование дополнительно можно использовать для формирования выборки определенных дискретных значений при проведении последующего анализа. При таком подходе работа портовой системы представляется в виде совокупности дискретных значений, соответствующих определенным уровням. Лицо, принимающее решение, формирует различный набор связей между желаемыми состояниями развития портовой системы и условиями их достижения и только после проведения предлагаемого в статье анализа может внести дополнительные корректировки в целевые функции портовых систем. В статье обосновывается точность данной модели и предлагается дополнить ее вероятностной функцией, описывающей влияние внешней среды. Предлагаемая модель может использоваться как в виде отдельного инструмента анализа состояний, так и параллельно с выполнением операционного моделирования работы терминала.*

*Ключевые слова: показатели производительности, состояния порта, дискретизация, прогнозирование, нахождение состояний портовой системы.*

**Для цитирования:**

Майоров Н. Н. Моделирование состояний морского терминала на основе дискретизации процессов / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-20-29.

### **Введение (Introduction)**

Среди множества логистических задач, рассматриваемых при организации систем, всегда присутствует задача выработки стратегии достижения наилучших показателей и соответствующих им состояний системы. Таким результатом может быть достижение либо максимально возможного (с учетом возможностей инфраструктуры) объема грузопотока, либо пассажиропотока, либо вообще достижение наибольшего развития инфраструктуры порта или терминала, позволяющей обработать увеличивающийся грузо- или пассажиропоток.

Состояние транспортной системы в каждый момент времени можно описать с помощью некоторого множества переменных параметров. К примеру, статистическая информация по работе терминала часто представляется в дискретной форме, и каждое последующее значение через определенный равный интервал времени наблюдения за системой обеспечивается определенным набором параметров терминальной инфраструктуры. Количество таких параметров может быть достаточно большим в зависимости от уровня рассмотрения и детализации изучения структуры процессов.

При выполнении исследований возникает задача выбора наиболее значимых переменных и, как следствие, всегда существует вероятность потери определенных данных. В ряде источников подобные задачи решаются с использованием аппарата принятия решений в условиях неопределенности [1, с. 12]. Но так как данный метод основывается на вероятностных данных, его точное использование затруднительно. Кроме того, необходимо выделить новую возможность проведения исследования оценки достижения системой определенного заданного или планируемого состояния, а также возможность не только проанализировать работу в прошлом за определенный интервал времени, но и решить задачу прогноза развития. В связи с этим возникает вопрос: *можно ли достичь более лучших состояний системы при имеющихся параметрах инфраструктуры?* При этом нет прямой необходимости основываться на методах линейной оптимизации системы. Оптимизация позволяет выявить наиболее важные переменные и их взаимосвязи. Классические методы оптимизации применительно к рассматриваемой задаче будут использоваться уже после проведения анализа на возможные наилучшие состояния системы. Дискретный характер большинства переменных не позволяет применять классические методы функционального анализа, но при этом и перебор различных вариантов состояний системы не обеспечивает точности принятия решений. Сложность при изучении состояний портовых систем обусловлена также наличием таких условий, как сезонность и периодичность. В данном случае необходимо сформулировать условия исключений для анализа состояний системы либо добавить новые переменные для обеспечения условий сезонности.



В данном случае классическое применение моделей на основании уравнений Колмогорова [2], описывающих предельные вероятности состояний переходов для объектов системы, не могут применяться, так как в результате их использования не удастся получить точные значения состояний системы. Данные модели основываются на переходе системы из одного состояния в другое, но в данном случае состояние системы не меняется. Изменяемым параметром служат переменные, характеризующие инфраструктуру порта или терминала.

Целью данной статьи является обоснование применения метода и математической модели, способной решить задачу точного нахождения состояний портовой или терминальной системы по имеющимся дискретным значениям на основе применения теоремы Котельникова и проведения последующего анализа для выработки мер достижения наилучшего состояния. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: представить исходный дискретный процесс работы морского терминала, описать возможные математические модели для определения состояний и обосновать расчет уровней для достижения наилучших состояний, провести сравнение моделей и выполнить расчет с использованием теоремы Котельникова, представить алгоритм и модель принятия решений по улучшению состояния системы.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Известно, что рассматриваемую задачу можно решать, основываясь на формализованной геометрической интерпретации состояния и движении системы в так называемом *фазовом пространстве*  $R^n$ . Пространство состояний должно рассматриваться как дискретное, поэтому любое значение, изображающее состояние системы, не может находиться в любом месте области допустимых состояний, а только в определенных фиксированных точках этой области. Для состояний, которые зависят от переменных инфраструктуры, только дискретно можно изменить количество задействованных причалов, количество перегрузочного оборудования либо количество рамок дозора пассажиров в морском пассажирском терминале. В данном случае состояние транспортной системы в определенный момент можно представить в виде множества переменных, соотнесенных с конкретными объектами инфраструктуры в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_0(t=0) &= \{a_{01}, a_{02}, \dots, a_{0n}\}; \\ x_1(t=1) &= \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}\}; \\ &\dots \\ x_n(t=n) &= \{a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_n(t=0, 1, \dots, n)$  — конкретные дискретные состояния транспортной системы;  $t$  — значения времени, когда производятся наблюдения или замеры по грузопереработке;  $a_{11}, \dots, a_{nn}$  — количественные переменные, отражающие число объектов транспортной инфраструктуры, которые были задействованы в процессе грузопереработки.

При рассмотрении состояний морской системы количество переменных может отличаться друг от друга. Например, в одном случае определенное состояние характеризуется загруженностью всех причалов и морских фронтов, в другом — данные могут собираться только по некоторым причалам. Невключение причалов может определяться их простым или некоторым техническим сбоем в работе оборудования. В данном случае простой вызывает издержки в работе. Как следствие, на практике, при выполнении исследования систем на макроуровне, используются суммарные значения при различных наборах переменных и это видно при отражении статистической информации о работе порта. При исследовании состояний портовой системы на микроуровне задача сводится к исследованию работы каждого причала, что может изменить общую ситуацию, полученную на макроуровне.

Для лица, принимающего решение, необходимо достижение наилучших состояний работы портовой системы как при решении оперативных вопросов, так и вопросов прогнозирования



на определенный временной интервал. Для решения данных вопросов предлагается выполнить приведенную последовательность операций:

- 1) сформировать дискретный интервал для проведения исследования из имеющихся динамических данных;
- 2) сформировать критерии выборки состояний портовой системы, характеризующейся ее наилучшими параметрами, и соотнести данные состояния с объектами инфраструктуры;
- 3) сформировать критерии выборки наихудших состояний портовой системы и соотнести полученные данные с объектами инфраструктуры;
- 4) проанализировать полученные массивы значений, используя интерполяцию, и выполнить теоретическую оценку недостающего уровня;
- 5) сформировать систему оперативного воздействия для улучшения состояний системы и проведения анализа имеющихся объектов портовой инфраструктуры.

Рассматриваемая теоретическая ситуация приведена на рис. 1. За исходные данные принят пассажиропоток морского пассажиропотока терминала «Морской фасад» с 2008 по 2017 гг. [3], [12]. В статьях [4], [5] проводятся исследования подхода к мониторингу объектов инфраструктуры и описываются инфраструктурные особенности терминала, приводится специализированная имитационная модель для прогнозирования операционной деятельности работы терминала. Необходимо отметить, что несмотря на то, что наблюдается рост уровня динамики пассажиропотока, при анализе причалов, согласно данным источника [6], выявляется неравномерность загруженности причалов. Таким образом, в общую статистику работы вошли данные по работе терминала на макроуровне, характеризующиеся различным набором состояний системы на микроуровне, т. е. различным набором причалов с их инфраструктурными особенностями. Для лица, принимающего решение, дополнительно необходимо решить следующий круг вопросов:

- вопросы организации равномерной нагрузки на причалы в течение навигации;
- вопросы исследования состояний системы, как и в случае, рассматриваемом при исследовании причин недостижения определенного уровня как в прошлом, так и при решении задач прогнозирования (см. рис. 1 для 2016 г.).

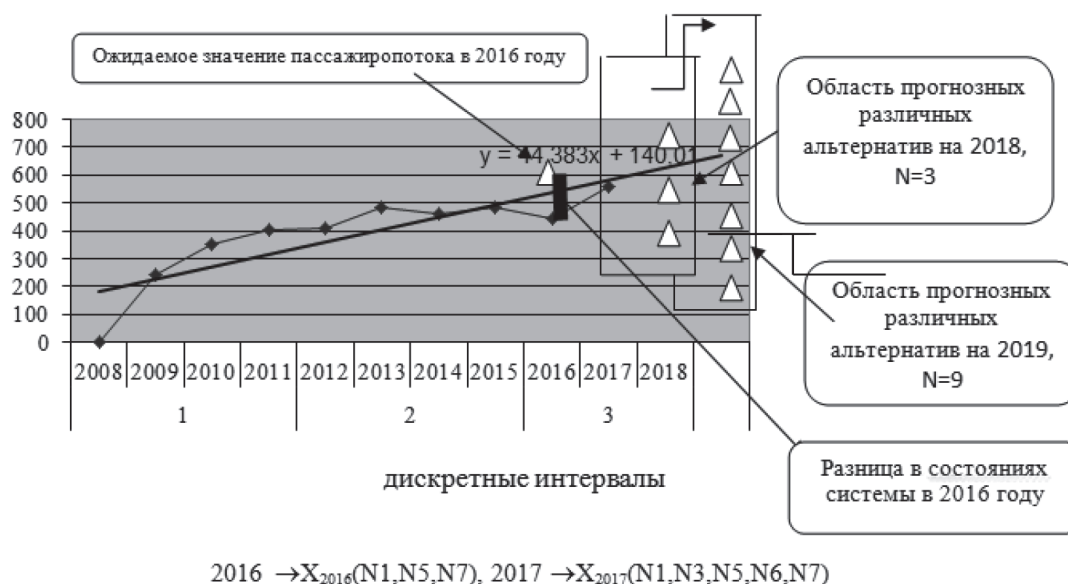


Рис. 1. Информация по пассажиропотоку 2009 – 2017 гг.: переменные состояния ( $N_i$  — причал) и вероятностные прогнозные положения состояний системы

В ряде источников (например, [7]) для расчета состояний системы необходимо определять возможные переходы состояний. Поскольку каждое состояние характеризуется определенным набором переменных инфраструктуры, для их переходов необходимо рассчитать предельные веро-

ятности. Пусть для обеспечения бесперебойной работы терминала задействовано не более  $n$  причалов. На вход системы поступает расписание заходов судов. Переходы системы представляются в форме ориентированного графа [2, с. 189]. Тогда она описывается уравнениями Колмогорова в следующем виде:

$$\begin{aligned} dp_0(t) / dt &= \mu p_1(t) - \lambda(t) p_0(t); \\ &\dots \\ dp_i(t) / dt &= \lambda(t) p_{i-1}(t) + (i+1) \mu p_{i+1}(t) - (\lambda(t) + i \mu) p_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1); \\ &\dots \\ dp_n(t) / dt &= \lambda(t) p_{n-1}(t) - n \mu p_n(t), \end{aligned} \quad (2)$$

и граничным условием  $\sum_{i=1}^n p_i(0) = 1$ ,

где  $\lambda(t), \mu(t)$  — функция интенсивностей переходов из одного состояния в другое;  $i$  — индекс, соответствующий определенному состоянию;  $p_i(t)$  — функция вероятности состояний.

Отыскание решения системы (2) в общем виде и при произвольной функции  $\lambda(t)$  представляет значительные трудности и не имеет практического приложения. При решении различных подобных задач нужно знать характеристики изучаемого процесса  $X(t) : M[X(t)], D[X(t)]$ , а одномерный закон распределения  $p_i(t) = P\{X(t) = i\}$  является промежуточным звеном при таком подходе. Для лица, принимающего решение, необходимо иметь более точную методику и модели для расчета при имеющихся дискретных значениях системы.

#### *Использование теоремы Котельникова для нахождения непрерывных значений состояния портовой системы*

Для точного нахождения состояний системы необходимо применять теорему Котельникова [8], согласно которой любые процессы являются плавными функциями времени, скачки значений в них практически не наблюдаются. Поэтому такой процесс можно представить последовательностью его значений, взятых с некоторым шагом по времени. При малом шаге, к примеру, при непрерывном мониторинге за состояниями системы, последовательность значений точно описывает график состояний системы. При имеющихся больших интервалах наличия информации о работе системы точно восстановить график функции сложно, так как пропущены его точки экстремума.

Теорема Котельникова позволяет найти необходимые состояния системы. Любой график представляется множеством его дискретных значений. Функцию системы  $F(t)$ , состоящую из определенного дискретного набора состояний, можно непрерывно определять с любой точностью при помощи значений состояний, следующих друг за другом через интервал времени  $\Delta t = \frac{1}{F_n}$ . Моменты времени состояний системы определяются как  $t_k = k \Delta t$ , при условии отстояния друг от друга за интервал времени  $\Delta t = \frac{1}{2f}$ . Восстановление любого состояния системы определяется по формуле

$$x(t) = \sum_{k=0}^K x_k \frac{\sin \omega_2(t - k \Delta t)}{\omega_2(t - k \Delta t)}, \quad (3)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

Согласно теореме Котельникова, непрерывные значения состояний портовой системы  $x(t)$  можно представить в виде интерполяционного ряда, при условии, что интервал дискретизации удовлетворяет ограничениям  $0 \leq \Delta \leq \frac{1}{2f}$ , где  $f$  — максимальная частота, ограниченная спектром реальных значений в результате наблюдения за системой. Тогда состояния могут быть определены согласно следующему выражению:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k \sin \omega(t - k\Delta t). \quad (4)$$

Необходимо также отметить, что в моменты времени  $t_{k-1} = (k-1)\Delta t$  и  $t_{k+1} = (k+1)\Delta t$  значения будут равны нулю.

Процесс точного нахождения состояния системы по имеющимся дискретным значениям представлен на рис. 2.

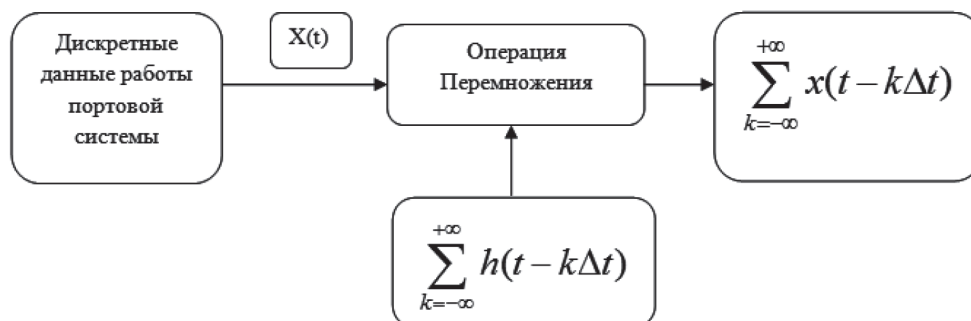


Рис. 2. Процесс дискретизации состояний системы

На рис. 2 на один вход поступает исходный непрерывный процесс  $x(t)$  работы портовой системы, на второй вход — система единичных дискретных значений, следующих друг за другом в течение периода  $\Delta t$ .

Примем дискретный интервал 2014 – 2017 гг. и выполним оценку ожидаемого уровня 2016 г. Согласно статистической информации, пассажиропоток составил 456495 пассажиров. В общем графике на данном этапе наблюдается снижение пассажиропотока по сравнению с прошлым периодом. Уравнение для расчета имеет следующий вид:

$$X_{2016} = F_{2014} \frac{\sin(\omega t_{2016})}{\omega t_{2016}} + F_{2015} \frac{\sin(\omega t_{2016} - \pi)}{\omega t_{2016} - \pi} + F_{2017} \frac{\sin(\omega t_{2016} - 2\pi)}{\omega t_{2016} - 2\pi},$$

где  $t_{2016}$  — дискретный момент времени, для которого нужно выполнить расчет состояния;  $F_{2014}$ ,  $F_{2015}$ ,  $F_{2017}$  — конкретные значения по пассажиропотоку.

Графическая интерпретация расчета приведена на рис. 3. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что на основании имеющихся данных пассажиропоток за 2016 г. должен был составить 561378 пассажиров. Расхождение в значениях составляет  $\theta = 104883$  пассажиров. Данный вывод применим к любому набору дискретных состояний системы, так как он позволяет найти любое состояние системы. Основное внимание необходимо уделять выбору интервала дискретизации.

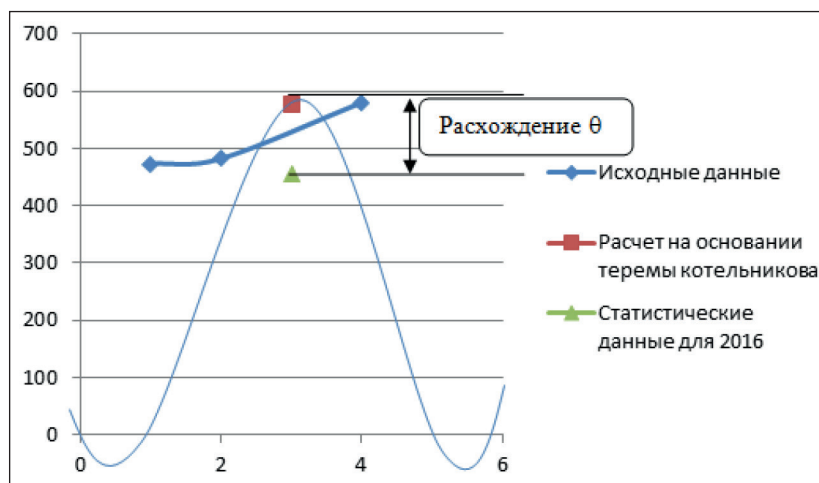


Рис. 3. Реализация нахождения состояния системы по дискретным значениям

Следует отметить, что при решении предусматривалось условие постоянства действия внешней среды и постоянство числа задействованных причалов. Для учета влияния внешней среды необходимо внести дополнительную функцию, отражающую как положительное, так и отрицательное влияние внешней среды:

$$x(t) = \sum_{k=0}^K x_k \frac{\sin \omega_2(t - k\Delta t)}{\omega_2(t - k\Delta t)} \pm \alpha(t), \quad (5)$$

где  $\alpha(t)$  — функция, отражающая влияние внешней среды (к примеру, функция возможного уменьшения пассажиропотока);

Знак « $\pm$ » отражает характер влияния данной функции на исследуемый процесс. Так как влияние внешней среды носит вероятностный характер, то при исследовании данная функция может преобразоваться в набор функций, среди которых за основную будет принята функция, имеющая наименьшие ошибки.

На основании полученного расчета лицо, принимающее решение, должно сформировать систему принятия корректировочных решений для минимизации ошибок. Общая схема формирования модели корректирующих воздействий представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема формирования модели корректирующего воздействия

На основании рис. 4 и предлагаемой модели оценки состояний портовой системы в контур принятия решения по управлению портом дополнительно вносится учет корректирующего воздействия  $X_{кор}(t)$  состояний системы. При этом предлагаемая модель должна использоваться параллельно с блоком моделирования операционной деятельности. На основе моделирования определяется прогнозная загруженность элементов инфраструктуры [9] – [11], [13] и уже затем выполняется расчет состояний, в то время как с использованием предлагаемой модели открывается возможность напрямую рассчитать необходимое состояние портовой системы.

### Результаты (Results)

На основании проведенного исследования для статистических данных по работе морского пассажирского порта «Морской фасад» было произведено восстановление состояния системы за 2016 г. с использованием процесса дискретизации. По полученным результатам были рассчитаны потери портовой системы. Предложенный расчет может быть применим для любого набора дискретных значений как наихудших, так и наилучших состояний любой портовой системы. Произведенный расчет был выполнен без анализа влияния внешней среды. Для учета влияния предлагается включение дополнительной функции, отражающей как положительное, так и отрицательное влияние внешней среды. На основе выполненных расчетов сформирована схема корректирующего воздействия на портовую систему для улучшения ее работы.

### Обсуждение (Discussion)

В качестве примера приведен расчет состояния морского порта «Морской фасад» на 2016 г. Исходными данными послужила статистика пассажирооборота в течение всего периода времени работы. Данные прошли через выборку наихудших и наилучших значений системы. Объектом исследования был выбран интервал, который отразил спад по пассажиропотоку. На основании выполненного исследования путем восстановления значения пассажирооборота за 2016 г. по набору дискретных наилучших значений было получено состояние, которое отличается от реальных данных. В случае, если бы рассчитанный уровень на 2016 г. был реализован, то и в последующие годы должно было наблюдаться улучшение показателей. Для точности проведенных исследований предложена модель процесса дискретизации с добавлением функции влияния внешней среды.

### Заключение (Conclusion)

Настоящие исследования направлены на разработку модели для изучения состояний портовых систем и последующего анализа причин недостижения требуемых параметров работы. Методика базируется на формировании условий выборки состояний системы с учетом связного набора переменных, обеспечивающих каждое состояние инфраструктуры, получении массива дискретных данных и проведении расчета необходимых состояний на основании положений теоремы Котельникова. В данном аспекте представляется новым подход к исследованию портовых систем на основе дискретизации. Правильность подхода подтверждается выполненным расчетом. При этом предлагается произвести учет воздействия внешней среды путем добавления новой вероятностной функции. Рекомендуются учитывать как положительное, так и отрицательное воздействие внешней среды.

Представленную методику можно использовать как параллельно с выполнением операционного моделирования работы портовой системы, так и отдельно, при заданных дискретных значениях. Для специалистов отрасли открывается возможность использовать модель как на макроуровне, так и применять для анализа отдельных узлов микроуровня портовых систем. Предлагаемая методика, как ожидается, будет достаточно полезной для специалистов как на стадии операционного управления терминалом, так и при решении прогнозирования его работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности / Л. Г. Бродецкий. — М.: ACADEMA, 2010. — 336 с.
2. Венцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. — М.: Наука, 1991. — 384 с.
3. Морской Фасад [Электронный ресурс]. — Режим доступа <https://www.portspb.ru> (дата обращения: 15.01.2018).
4. Майоров Н. Н. Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.



5. 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.

6. Порт Санкт-Петербург Морской Фасад. Расписание 2017 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kakdobratsyado.ru/country/rf/morskie-porty-rechnye-vokzaly-rf/passazhirskij-port-sankt-peterburg-morskoj-fasad/> (дата обращения: 15.12.2017).

7. Миллер Б. М. Теория случайных процессов в примерах и задачах / Б. М. Миллер, А. Р. Панков. — М.: Наука: Физмат-лит, 2007. — 317с.

8. Иванов Б. А. Элементы теории дискретных систем автоматического управления / Б. А. Иванов, А. В. Недвига. — Ухта: УГТУ, 2007. — 112 с.

9. Dragović 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.

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

11. 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.

12. Port Development. A handbook for planners in developing countries. — Second Edition, Revised and expanded. — New York: UNCTAD, 1985. — 227 p.

13. 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.

## REFERENCES

1. Brodetskii, G.L. *Sistemnyi analiz v logistike. Prinyatie reshenii v usloviyakh neoprede-lennosti*. M.: ACADEMA, 2010.

2. Ventsel', E.S., and L.A. Ovcharov. *Teoriya sluchainykh protsessov i inzhenernye prilozheniya*. M.: Nauka, 1991.

3. Morskoi Fasad. Web. 15 Jan. 2018 <<https://www.portspb.ru>>.

4. Maiorov, Nikolai Nikolaevich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Research operational management container terminal based on the transport model and simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.

5. Maiorov, Nikolai 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.

6. Port Sankt-Peterburg Morskoi Fasad. Raspisanie 2017. Web. 15 Dec. 2017 <<http://kakdobratsyado.ru/country/rf/morskie-porty-rechnye-vokzaly-rf/passazhirskij-port-sankt-peterburg-morskoj-fasad/>>.

7. Miller, B.M., and A.R. Pankov. *Teoriya sluchainykh protsessov v primerakh i zadachakh*. M.: Nauka: Fizmat-lit, 2007.

8. Ivanov, B.A., and A.V. Nedviga. *Elementy teorii diskretnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Ukhta: UGTU, 2007.

9. 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

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

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

12. *Port Development. A handbook for planners in developing countries*. Second Edition, Revised and expanded. New York: UNCTAD, 1985.

13. 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.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Майоров Николай Николаевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического приборостроения  
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, 67, лит. А  
e-mail: [nmsoft@yandex.ru](mailto:nmsoft@yandex.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Maiorov, Nikolai 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](mailto:nmsoft@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 16 января 2018 г.*

*Received: January 16, 2018.*

## THE POSITIONING OF THE SPREADER RELATIVE TO THE CONTAINER USING ULTRASONIC SENSORS

I. V. Zub<sup>1</sup>, Yu. E. Ezhov<sup>1</sup>, V. L. Shchemelev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> — Macro Group, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

*Processes for the handling of containers — the main activity of the cargo terminal, where the most important current direction is to automate the handling process, which includes incoming inspection of the container, automation of the handling process, diagnostics of technical condition of handling equipment. Modern reloading machines have a high degree of automation. Along with automatic control of individual systems is shared diagnostics of the technical state of machines, remotely change operating parameters, enabling to increase the productivity without stopping the working cycle. The most important part of the process of transshipment of containers is the spreader. Existing automation systems allow spreader to detect the gaps between the containers, which improves the accuracy of container location at the storage location. The positioning of the spreader relative to the container when the gripper is an urgent task to ensure the security and automation of cargo handling operations at the container terminal. The developed experimental model positioning spreader is designed to complement existing security devices and automation of handling equipment control the buildup of freight, installation of cameras, laser sensors controlling the position of the container relative to other containers. The use of experimental models allows you to position the spreader over the container, which eliminates operator errors, speeds up the processing of vehicles, reduces the likelihood of damage to the container. Automated control systems allow you to carry the container on the safe path and just set it to a specified storage location through positional control, which increases the likelihood of trouble-free operation of the terminal.*

*Keywords: automation, cargo terminal, container handling equipment, spreader, safety handling processes, trouble-free operation, automation spreader, process, positioning.*

**For citation:**

Zub, Igor V., Yurii E. Ezhov, and Viktor L. Shchemelev. "The positioning of the spreader relative to the container using ultrasonic sensors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 30–38. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-30-38.

**УДК 656.613: 656.614.35: 65.011.56**

## ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СПРЕДЕРА ОТНОСИТЕЛЬНО КОНТЕЙНЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ

И. В. Зуб<sup>1</sup>, Ю. Е. Ежов<sup>1</sup>, В. Л. Щемелёв<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> — ООО «Макро ЕМС», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Технологические процессы по обработке контейнеров — основной вид деятельности грузового терминала, где наиболее приоритетным в настоящее время направлением является автоматизация перегрузочного процесса, которая включает входной контроль контейнера, автоматизацию процесса перегрузки и диагностику технического состояния перегрузочной техники. Современные перегрузочные машины имеют высокую степень автоматизации. Наряду с автоматическим управлением отдельными системами проводится общая диагностика технического состояния машин, дистанционно изменяются рабочие параметры, позволяющие увеличивать производительность, не прекращая рабочего цикла. Наиболее важным звеном технологического процесса перегрузки контейнеров является спредер. Имеющиеся системы автоматизации спредера позволяют обнаруживать зазоры между контейнерами, что повышает точность установки контейнера на место хранения. Позиционирование спредера относительно контейнера при его захвате является актуальной задачей для обеспечения безопасности и автомати-*

зации перегрузочных работ на контейнерном терминале. Разработанная экспериментальная модель позиционирования спредера дополняет имеющиеся устройства и способы безопасности и автоматизации перегрузочной техники: контроль раскачки груза, установку камер наблюдения, лазерные датчики, контролирующие положение контейнера относительно других контейнеров. Использование экспериментальной модели позволяет позиционировать спредер над контейнером, что исключает ошибки оператора, ускоряет обработку транспортных средств и уменьшает вероятность повреждения контейнера. Системы автоматизированного управления позволяют пронести контейнер по безопасному пути и точно установить его на заданное место хранения посредством позиционного управления, что повышает вероятность безаварийной работы терминала.

*Ключевые слова:* автоматизация, грузовой терминал, контейнер, перегрузочная техника, спредер, безаварийная работа, технологический процесс, позиционирование.

**Для цитирования:**

Зуб И. В. Позиционирование спредера относительно контейнера с применением ультразвуковых датчиков / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. Л. Щемелёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 30–38. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-30-38.

### **Введение (Introduction)**

Контейнеризация грузов привела к созданию единого стандарта для грузовой тары и транспортных средств (ТС), что позволяет разрабатывать специальную перегрузочную технику (ПТ), автоматизировать её диагностику [1], процессы управления терминалом [2] и входной контроль контейнера с помощью системы OCR (Optical Character Recognition), а также регистрировать их номера [3]. Автоматизация погрузочно-разгрузочных работ — это не только время сокращения обработки ТС, но и важная составляющая конкурентоспособности терминала. В исследовании [4] показано, что клиенту очень важно, чтобы обработка ТС, в частности судна, производилась в планируемые сроки, что отражается на расписании работы судна.

Среди объектов терминала, подлежащих автоматизации, особую роль приобретает деятельность отдельного звена — *спредера*, что позволяет использовать внутренние структурные возможности звена как системы. Автоматизация спредера не затрагивает деятельность других подсистем ПТ, что сокращает расходы на модернизацию ПТ. Эти факторы дают возможность автоматизировать перегрузочный процесс, что приводит к сокращению времени простоя ТС под обработкой. Автоматизация позволяет контролировать перегрузочные процессы и сокращает долю участия в этом процессе оператора, что исключает риск ошибок человека в состоянии усталости или при воздействии других психофизиологических причин.

Автоматизация технологической операции наведения спредера на контейнер позволит ускорить процесс обработки транспортных средств. Поскольку данный процесс является циклическим, его можно запрограммировать. В настоящее время существуют автоматизированные терминалы, на которых, в частности, процесс погрузки / выгрузки с / на судно осуществляется при управлении ПТ. Такие терминалы обозначаются термином «полуавтоматические». Из всего терминального оборудования автоматизация ПТ менее всего развита [5]. Даже если ПТ оснащена автоматической системой, которая регулирует раскачку груза, отслеживает профиль контейнеров и выполняет другие операции, то оператор контролирует ее работу. Кроме того, существуют операции, которые выполняются вручную [6], [7]. Для сокращения времени обработки ТС необходимо точное позиционирование ТС и контейнера. Для этого на кране устанавливаются камеры, которые передают изображение для оператора на дисплей, что позволяет ему выбрать необходимый алгоритм действий.

Фирма-производитель «Вотта» разработала спредер с семью датчиками, которые обнаруживают зазоры между контейнерами. При обработке полученной информации спредер автоматически раздвигается или собирается для обработки, соответственно, 40- или 20-футового контейнера. Если существует опасность удара торцевой балкой спредера о контейнер, то спредер будет собран в исходное положение [8]. На некоторых моделях ПТ на тележках установлены

лазерные датчики, которые показывают положение перегружаемого контейнера относительно стоящего, что позволяет при постановке контейнера замедлить скорость движения и поставить без удара контейнер на место хранения или ТС [9]. В работе [10] рассмотрена система взвешивания, определяющая предельные значения груза по величине напряженности магнитного поля, создаваемого двигателем постоянного тока.

На перегружателях на пневмоколесном ходу RTG устанавливается лазерная система, состоящая из двух лазерных сканеров и управляющего контроллера. Сканеры установлены на порталах перегружателей RTG. Задачей сканеров является посредством перевода в электронный вид (оцифровки) пространства под краном определить положение ТС или контейнера.

Автоматизация любого терминала требует замены оборудования и совместимости работы программного обеспечения ПТ. Предлагаемая в статье разработка позволяет автоматизировать только один процесс. Датчики, оборудование и программное обеспечение могут быть установлены на любом типе ПТ.

В работе рассмотрена разработка модели позиционирования спредера относительно контейнера с помощью ультразвуковых датчиков.

*Целью работы* является создание макета самостабилизирующегося спредера, а также описание алгоритма и принципа его работы. Предполагается, что внедрение данной разработки в практику позволит сократить время обработки контейнеров и, как следствие, уменьшить стоянку транспортных средств под грузовыми операциями. Уменьшение времени обработки транспортных средств позволяет увеличить календарный цикл проведения технического обслуживания перегрузочной техники, что способствует сокращению простоев техники в процессе технического обслуживания, и, соответственно, позволяет оптимизировать штатное расписание ремонтной службы терминала.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

На концах платформы модели установлены два ультразвуковых датчика. При подаче электропитания в сеть ультразвуковые датчики посылают сигнал. Ответный сигнал от поверхности контейнера поступает на микроконтроллер, где происходит считывание показаний. В блоке обработки данных полученная информация в виде длительности импульса обрабатывается и формируется переменная «Delta». Если импульс превышает установленный минимум, то на мотор подается сигнал, который приводит спредер в положение, параллельное контейнерам, что приводит к уравниванию импульсов и отключению мотора.

Для исключения ложных срабатываний вводятся следующие погрешности-ограничения, при которых сигнал не передается на мотор.

1. *Малые различия между значениями импульсов от датчиков* — первая погрешность, учитывающая неровности контейнера (рис. 1, а). В данном случае это может быть поврежденный контейнер. При наледи на контейнере в зимнее время датчики наледь «не видят» импульс отражается от ледяной корки.

На концах платформы модели установлено два ультразвуковых датчика [11]. При подаче электропитания в сеть ультразвуковые датчики посылают сигнал. Ответный сигнал от поверхности контейнера поступает на микроконтроллер, где происходит считывание показаний. В блоке обработки данных полученная информация в виде длительности импульса обрабатывается и формируется переменная «Delta». Если импульс превышает установленный минимум, то на мотор подается сигнал, который приводит спредер в положение, параллельное контейнерам, вследствие чего происходит уравнивание импульсов и отключение мотора.

2. *Слишком большие различия между импульсами датчиков* — вторая погрешность, которая учитывает ситуацию, когда спредер еще не наведен на контейнер, что исключает увеличение угла отклонения спредера от горизонта (рис. 1, б).



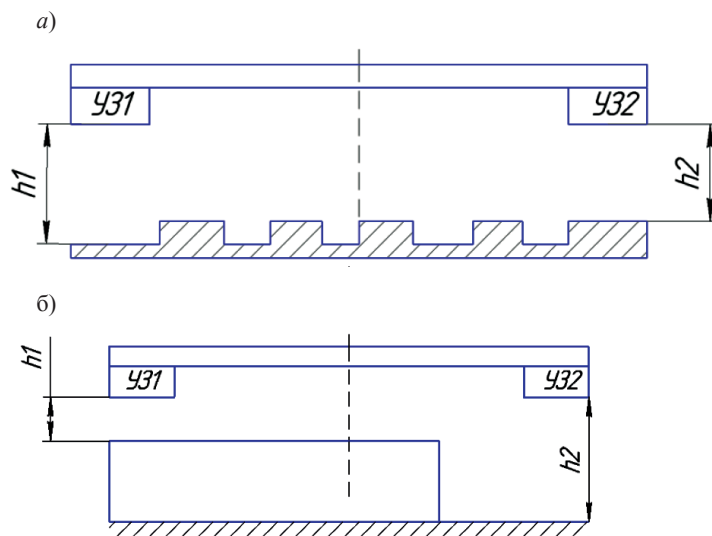


Рис. 1. Первая погрешность (а) и вторая погрешность (б) датчиков

**Выбор частоты резонатора.** Для работы с ультразвуковым датчиком используется прерывание, которое при изменении состояния логического уровня на выводе микроконтроллера «выводит» его из тела основной программы, и таймер TMR1, значение которого увеличивается на единицу при прохождении программой полного цикла.

Для того чтобы определить оптимальную частоту тактирования микроконтроллера, необходимо определить принцип работы используемых ультразвуковых датчиков. Принцип заключается в том, что после инициализации работы датчика он начинает посылать в течение определенного времени восемь равных ультразвуковых импульсов, которые отразившись от поверхности, принимаются этим же датчиком. До момента принятия последнего импульса датчик удерживает на линии высокий логический уровень (ВЛУ). Задача заключается в подсчете времени удержания датчиком ВЛУ ( $T_{ВЛУ}$ ).

Затем необходимо полученное значение преобразовать в расстояние до объекта, используя формулу

$$S = T_{ВЛУ} / 58. \quad (1)$$

Так как  $T_{ВЛУ}$  измеряется в микросекундах (мкс), необходимое условие тактирования микроконтроллера заключается в том, чтобы время цикла программы было равно 1 мкс.

Согласно технической документации на микроконтроллеры серии PIC16, программа проходит свой цикл за четыре такта резонатора:

$$F_{mk} = F_{osc} / 4. \quad (2)$$

Учитывая возможные варианты предделителя таймера TMR1, получим возможные частоты:

- предделитель 1:1 — частота резонатора 4 МГц;
- предделитель 1:2 — частота резонатора 8 МГц;
- предделитель 1:4 — частота резонатора 16 МГц;
- предделитель 1:8 — частота резонатора 32 МГц (не поддерживается выбранным микроконтроллером).

Учитывая, что на более низкой частоте потребление тока микроконтроллером ниже, выбираем  $F = 4$  МГц.

**Описание электрической схемы.** Питание электрической схемы (рис. 2) осуществляется постоянным / выпрямленным напряжением 12 – 24 В. При помощи стабилизаторов напряжение питания делится на 5 В и 12 В (5 В питают все слаботочные элементы цепи, такие как дисплей, микроконтроллер и два ультразвуковых датчика, 12 В питают электродвигатель).

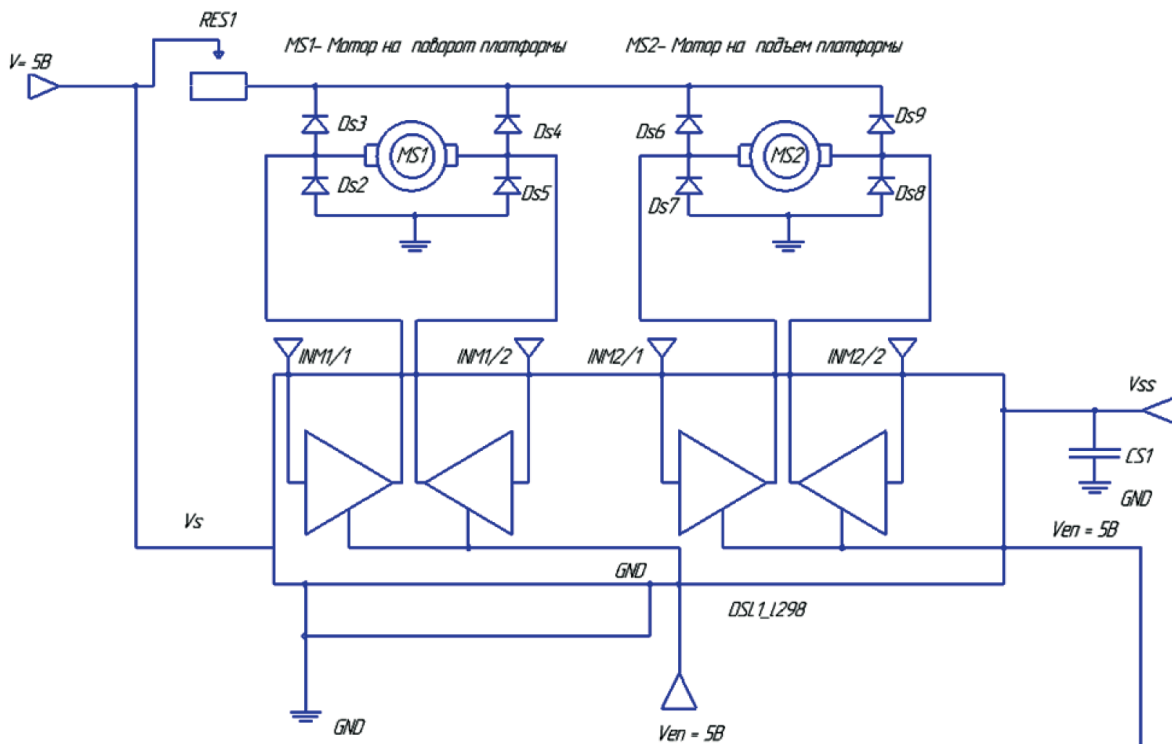


Рис. 2. Электрическая схема

Дисплей объединен с микроконтроллером 4-битным соединением. Переменные резисторы позволяют изменять интенсивность подсветки дисплея и контрастность отображенного текста. Светодиод, подключенный к микроконтроллеру, играет роль индикатора выполнения программы и введен в схему для выявления возможного выхода из строя микроконтроллера. Каждый раз при уходе программы в прерывание светодиод гаснет, а при возвращении в основное тело программы загорается.

Схема питания электромотора реализована следующим образом. В схему введен двухмостовой драйвер управления электродвигателями L298. В режиме ожидания на выводе «En» питание отсутствует. Подача питания на вывод «En» разрешает вращение мотора, а наличие напряжения на выводах «In1» или «In2» задает направление вращения мотора.

**Описание программной части.** Программа написана на языке «С» и состоит из трех частей: предварительная настройка, основное тело программы, подпрограмма прерываний.

1. *Предварительная настройка.* В данной части программы происходит подключение необходимых библиотек для работы с микроконтроллером, настройка конфигурирующих битов микроконтроллера, назначение портов вывода для работы с дисплеем, создание подпрограммы для конфигурации регистров микроконтроллера и объявление переменных и массивов.

2. *Основное тело программы.* В данном теле программы происходит отработка подпрограммы конфигурации регистров. Дополнительно в теле производится настройка прерываний от периферийных устройств, выбор активного фронта прерываний, сброс всех флагов прерываний и счетчиков таймера, а также инициализация дисплея с выводом на него сообщения.

После одноразового выполнения всех описанных ранее операций программа уходит в «вечный» цикл. Сделано это для того, чтобы каждый раз не производить конфигурацию микроконтроллера. В цикле происходит основная работа программы: снятие показаний с датчиков расстояния, формирование переменной Delta и подача импульса нужной полярности для вращения электромотора.

3. *Подпрограмма прерываний.* Для корректности показаний, снятых с датчиков расстояния, необходимо, чтобы во время подсчета временного интервала удержания датчиком ВЛУ микро-

контроллер не был занят другими процессами. Поэтому обнаружив сигнал от датчика, микроконтроллер переходит в подпрограмму прерывания. В этой подпрограмме отрабатывается цикл, в котором работает счетчик таймера. Как только датчик расстояния «отпускает» линию, в подпрограмме прерывания происходит подсчет и перевод полученных значений в сантиметры.

4. Подпрограмма «Стоп». При наведении грузозахватного органа на груз необходимо контролировать правильность позиционирования (рис. 3). При неправильном позиционировании необходимо запретить движение грузозахватного органа по оси  $OY$ , оставляя возможность движения по оси  $OX$ .

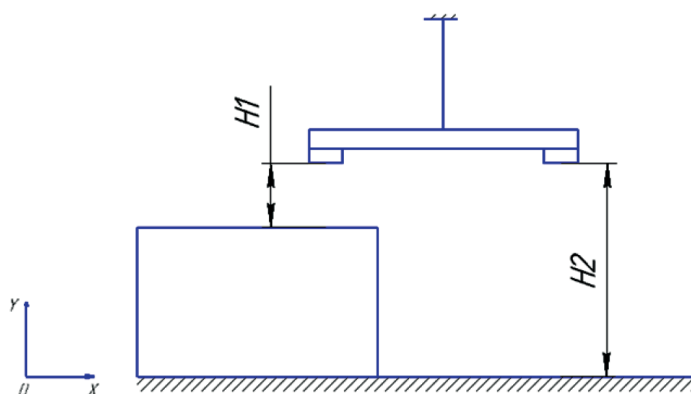


Рис. 3. Некорректное позиционирование спредера

Для реализации поставленной задачи, заключающейся в правильности позиционирования, разработана подпрограмма, которая при выполнении ряда условий блокирует возможность перемещения грузозахватного органа по оси  $OY$ .

Для выполнения подпрограммы должны выполняться следующие условия:

- 1)  $H1 \leq 0,15$  м; 2)  $H2 \geq 0,15$  м; 3)  $dH \geq 2,7$  м,

где  $H1$  — показания измерения датчика  $У31$ ;  $H2$  — показания датчика  $У32$ ;  $dH$  — разность показаний между  $H1$  и  $H2$ .

Причем должно выполняться условие 1 или условие 2 и условие 3.

Электрическая часть

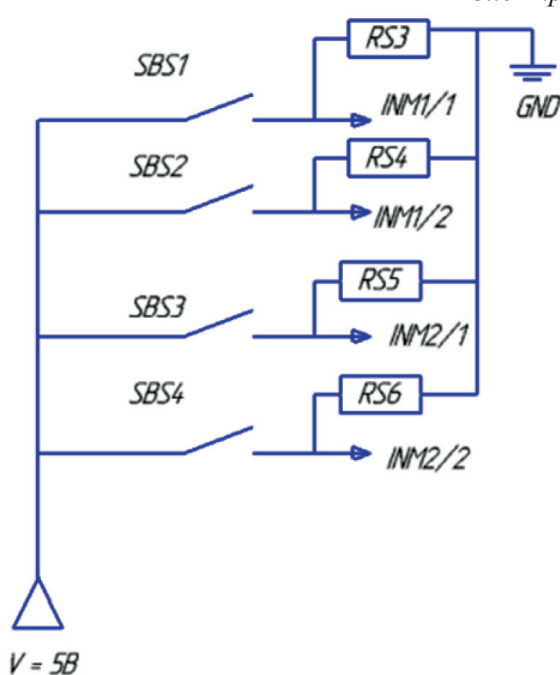


Рис. 4. Схема пульта управления

подпрограммы «Стоп»

Для проверки корректности работы подпрограммы «Стоп» добавлено два мотора, один из которых перемещает захват по оси  $OX$ , второй по оси  $OY$ . Управление моторами производится через двухмостовой драйвер моторов L298 [12].

Моторы приводятся в движение при помощи пульта управления (рис. 4), представляющего собой четыре кнопки, каждая из которых выполняет свою функцию:

- $SBS1$  — поворот влево;
- $SBS2$  — поворот вправо;
- $SBS3$  — подъем вверх;
- $SBS4$  — опускание вниз.

Разрешение / запрет перемещения грузозахватного органа по оси  $OY$  производится посредством реле  $KS1$ , которое управляется микроконтроллером PIC16F877A [13].

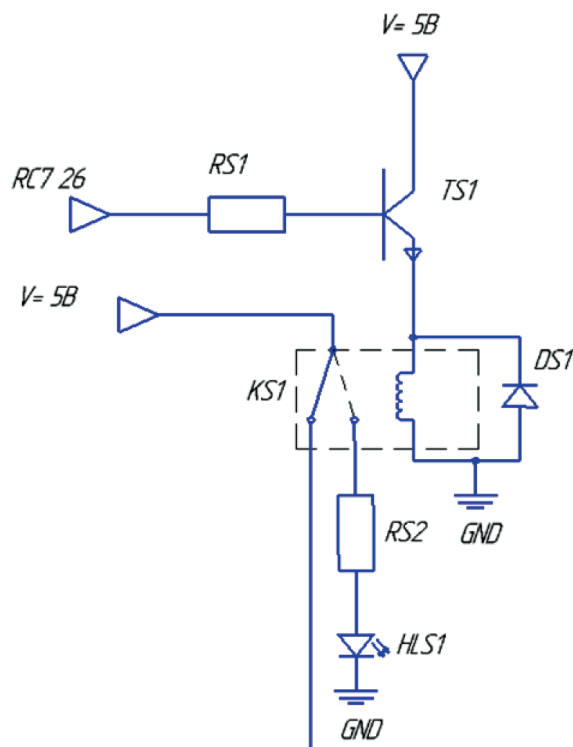


Рис. 5. Релейная схема разрешения / запрета перемещения по оси *OY*

В рабочем состоянии реле замыкает цепь питания мотора V-Ven, тем самым разрешая перемещение захвата по оси *OY* (рис. 5). При отработке подпрограммы «Стоп» микроконтроллер посылает управляющий импульс, тем самым размыкая цепь питания мотора V-Ven и запрещая движение по оси *OY*. Управляющий сигнал идет не напрямую к реле, а через транзисторный ключ, чтобы уменьшить нагрузку на вывод микроконтроллера. Диод *DS1* выполняет защитную функцию. При размыкании транзисторного ключа *TS1* в катушке *KS1* возникает ЭДС самоиндукции. Чтобы транзистор не вышел из строя, в цепи параллельно катушке *KS1* установлен диод.

### Результаты (Results)

Разработана экспериментальная модель позиционирования спредера относительно контейнера с помощью ультразвуковых датчиков. В результате создан макет самостабилизирующегося спредера, описан алгоритм и принцип работы устройства при перегрузке контейнеров на грузовых терминалах. Внедрение данной разработки в практику позволит сократить время обработки контейнеров и, как следствие, уменьшить стоянку транспортных средств под грузовыми операциями. Использование самостабилизирующегося спредера позволит более точно позиционировать спредер над контейнером, что даст возможность уменьшить возможные ошибки оператора и снизить вероятность повреждения контейнера.

### Заключение (Conclusion)

Технологические процессы по обработке контейнеров — основной вид деятельности грузового терминала, где в настоящее время наиболее приоритетным направлением является автоматизация перегрузочного процесса. Современные перегрузочные машины имеют высокую степень автоматизации, которая позволяет увеличивать производительность, не прекращая рабочего цикла. Дальнейшая работа, направленная на автоматизацию отдельных звеньев систем перегрузочных машин, дает возможность постоянно улучшать технологический процесс. Подход, при котором система автоматического управления звеном коррелирует с программным обеспечением системы, позволяет постоянно модернизировать перегрузочную технику при минимальных затратах.

Разработанная экспериментальная модель позиционирования спредера при её реализации позволит дополнить имеющиеся устройства безопасности и автоматизации перегрузочной техники, тем самым повысив эффективность работы перегрузочной техники в течение технологического процесса. Реализация разработки не требует изменения конструкции используемой на термине техники и может быть установлена в любой период эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежов Ю. Е. Имитационная модель на основе сетей Петри как средство диагностики перегрузочной техники / Ю. Е. Ежов, И. В. Зуб, С. С. Соколов // Речной транспорт (XXI век). — 2016. — № 4 (80). — С. 52–58.
2. Зуб И. В. Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 41–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-41-48.
3. Hughes A. Automate the date? / A. Hughes // Port Strategy. — November, 2005. — Pp. 32–35.
4. Lu J. An Empirical Study of Container Terminal's Service Attributes / J. Lu, X. Gong, L. Wang // Journal of Service Science and Management. — 2011. — Vol. 4. — № 01. — Pp. 97–109. DOI:10.4236/jssm.2011.41013.
5. Martin-Soberon A. M. Automation in port container terminals / A. M. Martin-Soberon, A. Monfort, R. Sapina, N. Monterde, D. Calduch // Procedia — Social and Behavioral Sciences. — 2014. — Vol. 160. — Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.131.
6. Lindeberg E. Improving the operational performance of STS cranes / E. Lindeberg // Port Technology International Journal. — 14, February, 2011. — Pp. 56–59.
7. Bryfors U. Embracing automation / U. Bryfors // Port Technology International Journal. — February, 2014. — Pp. 36–39.
8. Zrnic N. Automation of Ship-To-Shore container cranes: a review of State-of-the-Art / N. Zrnic, Z. Petkovic, S. Bosnjak // FME Transactions. — 2005. — Vol. 33. — Br. 3. — Pp. 111–121.
9. TMEIC, «Crane Control and Automation. Global Solutions», TMEIC Corporation, 2011 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tmeic.com/Repository/Others/TMEIC%20Crane%20Control%20and%20Automation%20A4.pdf> (дата обращения: 07.11.2017).
10. Дубровин Л. М. Контроль грузов на подъёмно-транспортных машинах / Л. М. Дубровин, А. П. Никишечкин, В. И. Давыденко // Мир транспорта. — 2016. — Т. 14. — № 3 (64). — С. 98–105.
11. Ultrasonic Ranging Module HC – SR04 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf> (дата обращения: 02.03.2017).
12. Dual full-bridge driver [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://lib.chipdip.ru/142/DOC000142991.pdf> (дата обращения: 06.03.2017).
13. Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology – PIC16F628A [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40044G.pdf> (дата обращения: 06.03.2017).

## REFERENCES

1. Ezhov, Yu.E., I.V. Zub, and S.S. Sokolov. "Imitatsionnaya model' na osnove setei Petri kak sredstvo diagnostiki peregruzochnoi tekhniki." *Rechnoi transport (XXI vek)* 4(80) (2016): 52–58.
2. Zub, Igor Vasilevich, and Yyri Evgenevich Ezhov. "Modeling of functioning of the transport terminal nested petri nets." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 41–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-41-48.
3. Hughes, A. "Automate the date?" *Port Strategy* November (2005): 32–35.
4. Lu, Jing, Xiaoxing Gong, and Lei Wang. "An empirical study of container terminal's service attributes." *Journal of Service Science and Management* 4.01 (2011): 97–109. DOI:10.4236/jssm.2011.41013.
5. Martin-Soberon, Ana Maria, Arturo Monfort, Rafael Sapina, Noemi Monterde, and David Calduch. "Automation in port container terminals." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 160 (2014): 195–204. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.131.
6. Lindeberg, E. "Improving the operational performance of STS cranes." *Port technology international. Journal* 14 February (2011): 56–59.



7. Bryfors, U. "Embracing automation." *Port Technology International Journal* February (2014): 36–39.
8. Zrnić, Nenad, Zoran Petković, and Srđan Bošnjak. "Automation of ship-to-shore container cranes: A review of state-of-the-art." *FME Transactions* 33.3 (2005): 111–121.
9. TMEIC, «Crane Control and Automation. Global Solutions», TMEIC Corporation, 2011. Web 7 Nov. 2017 <<http://www.tmeic.com/Repository/Others/TMEIC%20Crane%20Control%20and%20Automation%20A4.pdf>>.
10. Dubrovin, Lev M., Anatoly P. Nikishechkin, and Vladimir I. Davydenko. "Cargo control on handling machinery." *Mir transporta* 14.3(64) (2016): 98–105.
11. Ultrasonic Ranging Module HC – SR04. Web. 2 March 2017 <<http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>>.
12. Dual full-bridge driver. Web. 6 March 2017 <<https://lib.chipdip.ru/142/DOC000142991.pdf>>.
13. Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology — PIC16F628A. Web. 6 March 2017 <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40044G.pdf>>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Зуб Игорь Васильевич** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [zubiv@gumrf.ru](mailto:zubiv@gumrf.ru)

**Ежов Юрий Евгеньевич** —  
кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [ezhovye@gumrf.ru](mailto:ezhovye@gumrf.ru)

**Щемелев Виктор Леонидович** —  
ведущий инженер направления  
«Контрактное производство»  
ООО «Макро ЕМС»  
196105, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Свеаборгская, 12, пом. 3Н  
e-mail: [Viktor.Shchemelev@macrogroup.ru](mailto:Viktor.Shchemelev@macrogroup.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zub, Igor V.** —  
PhD  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [zubiv@gumrf.ru](mailto:zubiv@gumrf.ru)

**Ezhov, Yurii E.** —  
PhD, professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [ezhovye@gumrf.ru](mailto:ezhovye@gumrf.ru)

**Shchemelev, Viktor L.** —  
Leading Engineer in the  
"Contract Manufacturing"  
Macro Group, Ltd.  
12 Sveaborgskaya Str., St. Petersburg, 196105,  
Russian Federation  
e-mail: [Viktor.Shchemelev@macrogroup.ru](mailto:Viktor.Shchemelev@macrogroup.ru)

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2017 г.  
Received: December 29, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49

## FOR THE THEORY OF DESIGNING AND CALCULATION CONSTRUCTION OF SHIPBOARD HOISTING WINCHES WITH INTEGRATED PLANETARY GEARBOX

**A. K. Pshizov**

OJSC "ZAREM", Maykop, Russian Federation

*Integrated planetary gearboxes of leading west company are analyzed in the article to design competitive gearbox for shipboard winches of the same type for domestic needs. The analysis has been done from the point of view of the used structural scheme and from power-kinematical point of view. For the first time it was paid attention to necessity of studying the influence of rope location on the drum on load capacity of gearbox. For this purpose the calculation scheme and dependences on radial load on drum bearings and their estimation reactions are given in the article. It's determined that reaction values in drum bearings are changing linearly and depends on rope location on the drum. The calculation of radial displacements in drum's bearings depending on load value, radial backlash and deformation of rolling elements are made in article. The calculation of displacements made according to formulas which take into consideration a principle of load sharing between rolling elements. In the article was developed the method and algorithm for calculation the maximal load on rolling element. The method based on the solution of the problem about load sharing between rolling elements with using integral function. Approximate formulas of integral function depending on bearing type are determined. The dependence on calculation of radial displacement of inner bearing race relative to bearing outer race is given. Dependence is expressed as function of deformation parameter. The graphs of displacements in drum bearings depending on hoist rope location are given in the article. It's determined that displacement of races in drum bearings generate the axis skew of drum relative central axis of gearbox and generate uneven load sharing on face width of the last step of gearbox. It defines overall dimensions and weight of the gearbox. Efficiency of axis skew is given through coefficient of load sharing unevenness on face width.*

*Keywords: planetary gearbox, winch, shipboard crane, bearing, radial displacement, rolling element, load, deformation, skew, unevenness.*

### **For citation:**

Pshizov, Aydamir K. "For the theory of designing and calculation construction of shipboard hoisting winches with integrated planetary gearbox." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.

**УДК 621.833.61**

## К ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ СУДОВОЙ ЛЕБЕДКИ СО ВСТРОЕННЫМ ПЛАНЕТАРНЫМ РЕДУКТОРОМ

**А. К. Пшизов**

ОАО «ЗАРЕМ», Майкоп, Российская Федерация

*Проанализированы встроенные планетарные редукторы ведущих западных компаний, являющихся лидерами мирового машиностроения, с точки зрения создания отечественной конкурентоспособной конструкции подобного редуктора для канатной лебедки судовых кранов. Анализ выполнен с точки зрения энерго-кинематики и используемой структурной схемы. В статье впервые обращается внимание на необходимость изучения влияния положения троса на образующей барабана на нагрузочную способность зацеплений редуктора. С этой целью приводятся расчетная схема и зависимости для определения радиальных нагрузок на опоры барабана и их реакций. Установлено, что значения реакций в опорах барабана изменяются линейно в зависимости от положения троса лебедки. Выполнен расчет радиальных перемещений в опорах барабана в зависимости от величины нагрузки радиального зазора и деформации тел качения подшипников. Расчет перемещений выполнен по зависимостям, учитывающим закон распределения нагрузки между телами качения. Разработаны метод и алгоритм для определения*

максимальной нагрузки на тело качения, который основан на решении задачи о распределении нагрузки между телами качения с использованием интегральной функции. Установлены приближенные аппроксимирующие формулы интегральной функции в зависимости от типа подшипника. Приведена зависимость для расчета радиального перемещения внутреннего кольца подшипника относительно наружного в направлении действия радиальной нагрузки. Зависимость выражена в виде функции безразмерного параметра деформаций. Показаны графики зависимости смещений в опорах барабана от положения троса на образующей барабана. Установлено, что смещения колец в опорах барабана сопровождаются перекосом оси барабана относительно центральной осевой линии редуктора, вызывая неравномерное распределение нагрузки по ширине зубчатого венца тихоходной ступени, определяющее массогабаритные показатели планетарного редуктора. Определена степень влияния через коэффициент неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца.

**Ключевые слова:** планетарный редуктор, лебедка, судовой кран, опора, радиальное перемещение, тело качения, нагрузка, деформация, перекося, неравномерность.

#### Для цитирования:

Пишизов А. К. К теории проектирования и расчета конструкции судовой лебедки со встроенным планетарным редуктором / А. К. Пишизов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.

### Введение (Introduction)

Одной из прогрессивных компоновок планетарных дифференциально-замкнутых редукторов, созданных в последние годы европейскими фирмами, являются конструкции, размещаемые в канатном барабане лебедки. Дифференциальные механизмы в судостроении применяются в различных агрегатах, а их свойства продолжают являться объектом исследования разработчиков [1], [2]. Такие устройства отличаются рядом преимуществ: компактностью конструкции, высоким КПД, удобством в ремонте, широким диапазоном трансформации момента и др. У Российских разработчиков судовых и крановых механизмов дифференциальные механизмы вызвали определенный интерес, и сегодня известные отечественные фирмы устанавливают их в новые машины. В отрядах, где требуется использование собственной элементной базы, начали применять отечественные разработки. В этой связи появилась необходимость создания планетарных редукторов, полностью встраиваемых в барабаны грузовых лебедок судовых кранов, что, в свою очередь, потребовало выявления особенностей в их работе. В качестве аналога для отечественной разработки выбрана продукция компаний, являющихся лидерами мирового машиностроения (в частности, компаний *Brevini, Zollern, Siebenhaar* [3]). Трехступенчатый встроенный планетарный редуктор эти фирмы строят по схеме, показанной на рис. 1, а. Исключая один ряд, получают двухступенчатый редуктор, а добавляя один ряд, получают четырехступенчатый редуктор (модульный принцип).

Для выявления особенностей конструкции был проведен структурный анализ, который показал, что конструкция построена на базе хорошо известной в отечественной литературе обобщенной схемы. На рис. 1, б эта схема показана на основе источника [4, рис. 1.19, ж], а на рис. 1, в — на основе источника [5, табл. 19.2, схема 15]. Полный обзор методов представления сложных схем планетарных передач можно найти в работе [6]. Схема по российской терминологии содержит три рабочих звена: ведущее  $A$ , ведомое  $B$  и опорное  $f$ , и при трех однорядных механизмах содержит два вспомогательных звена —  $d$  и  $e$ . В работе [7] доказано, что одна такая обобщенная схема содержит  $\sigma(\pi, k_m) = \pi^{k_m} = 6^3 = 216$  кинематических схем, включающих, в общем случае, как редукторы, так и мультипликаторы, где  $\pi$  — число схем, реализуемых на базе одного механизма,  $k_m$  — количество однорядных механизмов в конструкции. Принимая во внимание формулу Виллиса  $i_{AB}^f = 1 - i_{Af}^B$ , в которой передаточное отношение  $i_{Af}^B$  образовано последовательным соединением трех однорядных механизмов:  $i_{Af}^B = i_{Ad}^B i_{de}^B i_{ef}^B$  и обозначив для краткости  $i_{Ad}^B = i_d, i_{de}^B = i_e, i_{ef}^B = i_f$ , найдем уравнение для определения передаточного отношения любого изделия, содержащего три ступени из их общего числа, равного 216, и выполненного по схеме рис. 1, б, в:

$$i^f = 1 - i_d i_e i_f. \quad (1)$$

Если в качестве однорядных механизмов в конструкции редуктора использовать механизмы с передаточным отношением  $|i| \geq 7$ , то в этом случае  $\pi = 2$ . На основе подобной структуры, охватывающей диапазон передаточных отношений  $|i'| \geq 342$ , можно образовать  $\sigma(\pi, k_m) = \pi^{k_m} = 2^3 = 8$  различных кинематических схем редукторов. Одна подобная схема из восьми возможных и была использована европейскими разработчиками. Заметим, поскольку в данной схеме каждое передаточное отношение из числа  $i_d, i_e, i_f$  положительно, то согласно формуле (1), направления вращения ведущего и ведомого вала в данном редукторе противоположны.

Энергетический анализ показал, что данная структура относится к классу двухконтурных последовательных схем [8]. С энергетической точки зрения [8], [9] практически выгодно создавать такие многопоточные схемы, в которых заведомо известны потоки мощности в их различных ветвях. В работе [8] показано, что если следующие передаточные отношения:  $1 - i_d, 1 - i_d i_e, 1 - i_d i_e i_f$ , имеют одинаковый знак, то мощность в каждом контуре раздваивается и передается двумя потоками, суммируясь на ведомом валу. Поскольку в схеме на рис. 1, а значения передаточных отношений всех трех однорядных механизмов в равенстве (1) больше двух, то, очевидно, что все указанные ранее передаточные отношения отрицательны, образуют убывающую последовательность и на основании данных источника [8] циркуляция мощности в схеме отсутствует.

С конструктивно-компоновочной стороны обращает на себя внимание тот факт, что заложенный модульный принцип создания линейки редукторов потребовал наличия трех фланцевых соединений, в которых на стыке двух корпусов установлены зубчатые колеса с внутренним зацеплением (эпициклы) всех механизмов, образующих в итоге вращающийся корпус редуктора. В конструкциях барабан лебедки установлен на двух опорах: со стороны привода барабан опирается на подшипник в редукторе, а с противоположной стороны — на подшипник, располагаемый в стойке рамы. В некоторых конструкциях лебедок барабан установлен на опорах, из которых две находятся внутри редуктора, а одна из них расположена с внешней стороны водила тихоходной ступени. Для размещения двухопорного водила тихоходной ступени необходимо дополнительное место по длине барабана, что при монтаже конструкции в стесненных габаритах приводит к увеличению размера лебедки в осевом направлении.

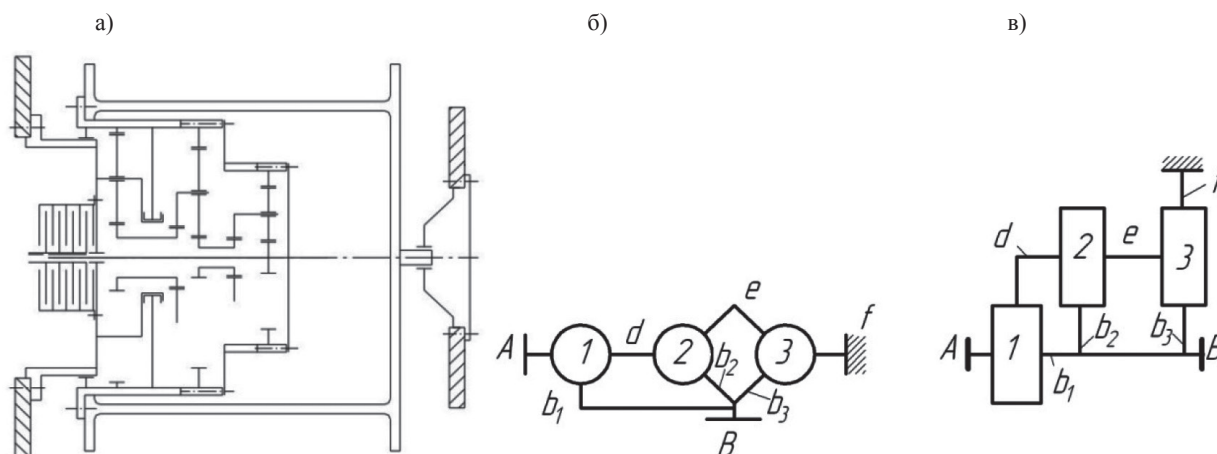


Рис. 1. Конструкция судовой лебедки:

- а — компоновочная схема лебедки европейских производителей со встроенным трехступенчатым планетарным редуктором;  
 б и в — обобщенные схемы трехступенчатого редуктора, представленные в отечественной литературе

На основании проведенного ранее анализа выполненных конструкций встроенных планетарных редукторов, в статье, в рамках реализации программы импортозамещения в России, решаются вопросы проектирования конкурентоспособного редуктора, полностью встраиваемого в барабан лебедки судового крана нового поколения. В статье впервые обращено внимание на не-

необходимость изучения влияния положения троса на образующей барабана на нагрузочную способность зацеплений редуктора.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Непрерывный высокий спрос на встроенные редукторы явился дополнительным побудительным стимулом к поиску улучшений конструкции европейских производителей. На основании результатов энергокинематического и конструктивно-компоновочного анализа, в новой конструкции по сравнению с сопоставимой планетарной передачей, во-первых, должна отсутствовать циркуляция мощности, что исключит понижение КПД и, во-вторых, конструкция должна иметь меньшие осевые габариты. Принимая во внимание, что одна обобщенная схема (рис. 1, б, в) включает восемь кинематических схем редукторов, с целью упрощения конструкции за счет уменьшения количества многофланцевых соединений была изменена кинематическая схема редуктора (рис. 2, а). При этом обобщенная схема трехступенчатого редуктора осталась без изменений, а, значит, и передаточное отношение редуктора определяется по формуле (1). Очевидно, что все приведенные ранее передаточные отношения положительны, образуют возрастающую последовательность и на основании [8] циркуляция мощности в схеме отсутствует: мощность  $P$  в каждом контуре раздваивается и передается двумя потоками, суммируясь на ведомом валу (см. рис. 2, б). На рис. 2, в показано формирование на базе данной схемы встроенных редукторов с различным количеством ступеней. Заметим, что согласно формуле (1), в лебедке, проектируемой на основе предлагаемой схемы, ведущий и ведомый валы имеют одинаковое направление вращения.

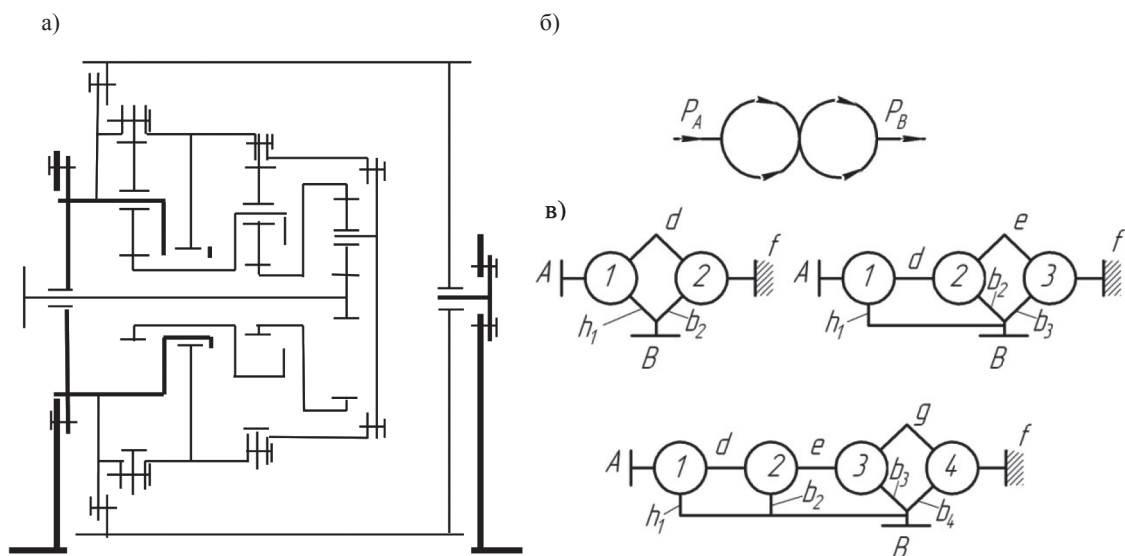


Рис. 2. Схемы встроенных редукторов: а — схемно-компоновочная конструкция лебедки; б — схема потоков мощности;

в — представление образования двух-, трех- и четырехступенчатых планетарных редукторов

С целью уменьшения осевых габаритов фиксирующая опора, размещенная с внешней стороны водила тихоходной ступени, была перенесена внутрь редуктора, что исключает также необходимость обслуживания первой опоры барабана в процессе эксплуатации лебедки [10]. Радиальная и осевая нагрузки, действующие на фиксирующую опору барабана, через корпус редуктора и фланцевое крепление передаются на опорную стойку рамы. Вторая опора барабана размещается в отдельной стойке и является плавающей (не фиксирующей барабан в осевом направлении). В то же время при размещении фиксирующей опоры с внутренней стороны неподвижного водила тихоходной ступени увеличивается воспринимаемая опорой радиальная нагрузка при положении силы натяжения троса на консольном участке барабана. Для определения количественной сторо-



ны влияния консольного расположения барабана в лебедке судового крана (рис. 3, а) потребовалось решение дополнительных вопросов.

Расчетная схема, используемая для решения дополнительных вопросов по обеспечению грузочной способности лебедки при заданном расположении опор барабана в судовом кране, приведена на рис. 3, б. Положение фиксирующей опоры относительно левого торцевого сечения барабана оценивается размером  $a$ , а положение плавающей опоры относительно торцевого сечения барабана — размером  $b$  ( $L$  — длина барабана). При вращающем моменте  $T$  и диаметре барабана  $D$  по средней линии навитого каната сила натяжения троса  $F$  определится по известной формуле  $F = 2T/D$ , согласно которой с помощью условий равновесия находятся реакции в опорах  $A$  и  $B$  барабана:

$$R_A = \frac{F(L+b-x)}{L+b-a}; R_B = \frac{F(x-a)}{L+b-a}. \quad (2)$$

При работе лебедки положение силы натяжения троса  $F$  изменяется в пределах  $0 \leq x \leq L$  и, как видно, реакции в опорах изменяются по линейному закону в зависимости от координаты  $x$ . Максимальная нагрузка на опору  $A$  при  $x = 0$  составляет  $R_{\max}$ , а при  $x = L$  нагрузка на эту опору достигает минимума и равна  $R_{\min}$ .

При расчете опоры качения на долговечность эквивалентная нагрузка, учитываемая при линейном законе изменения реакции опоры, определяется по формуле

$$R_E = R_{\max} \sqrt[m]{(1-\eta)^{m+1}} / [(1-\eta)(m+1)], \quad (3)$$

где  $\eta = R_{\min}/R_{\max}$  — параметр, учитывающий отношение экстремальных значений нагрузки. Показатель степени для шариковых подшипников составляет  $m = 3$ , для роликовых  $m = 10/3$ .

Расчетная динамическая грузоподъемность подшипника на стадии проектирования может быть вычислена по приближенной формуле

$$C = 1,2 R_E \left( L_h \frac{60n}{10^6} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

где  $L_h$  — ресурс изделия;  $n$  — частота вращения барабана, поскольку водило тихоходной ступени неподвижно.

С уменьшением ресурса допускаемая нагрузка на подшипник, а следовательно, и напряжения в контакте увеличиваются. С целью исключения опасных для работы остаточных деформаций и задиров нагрузку ограничивают статической грузоподъемностью подшипника  $R_{\max} \leq C_0$ .

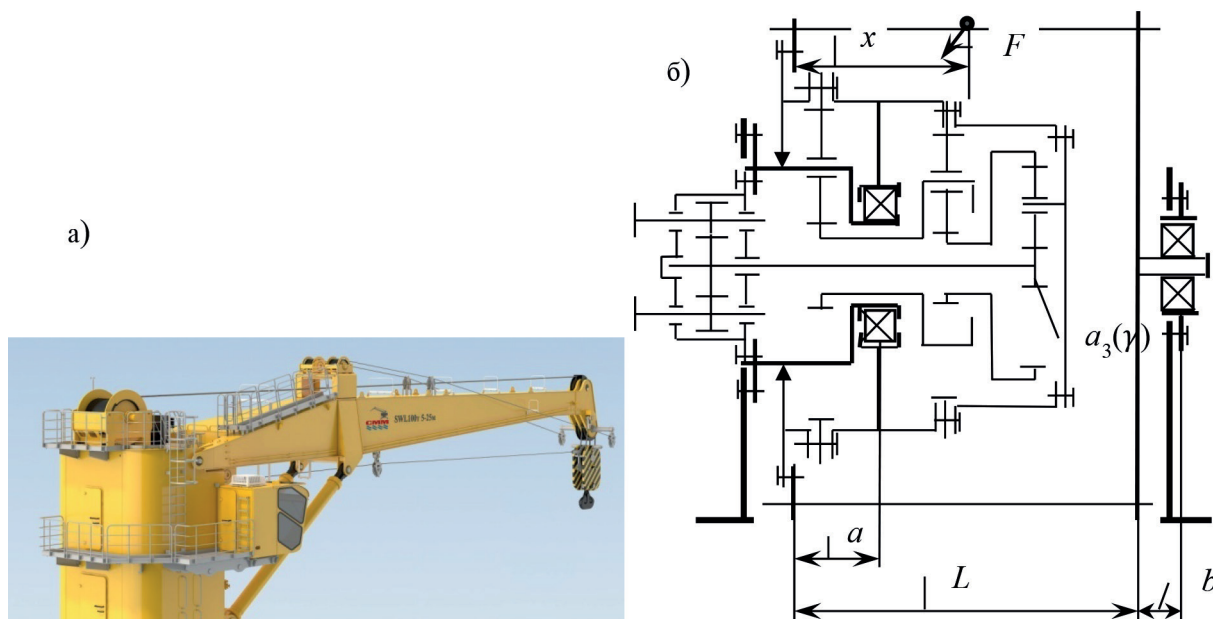


Рис. 3. Размещение лебедок на кране: а — общий вид судового крана; б — схема к расчету радиальной нагрузки на встроенную опору

Под действием нагрузки в фиксирующей опоре возникают перемещения, которые оказывают влияние на условия работы зубчатых колес встраиваемого редуктора, а именно смещение колец в опорах барабана, сопровождающееся перекосом  $\gamma_0$  оси барабана. Известно, что долговечность зубьев резко снижается при перекосе осей. В случае, когда сателлиты не вращаются вокруг основной оси планетарной передачи, в зависимости от их положения неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатого венца приводит либо к непараллельности осей, либо к перекосу осей или к наличию обоих влияний. Это оказывает влияние на коэффициент неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца  $K_{н\beta}$  тихоходной ступени планетарного редуктора. Поэтому после выбора подшипника устанавливается степень влияния угла перекоса на нагрузочную способность редуктора. Для оценки этого влияния далее предлагается методика расчета перемещений в фиксирующей опоре редуктора, которые зависят от величины нагрузки, зазора и деформации тел качения.

Радиальный зазор в подшипнике приводит к некоторому свободному перемещению наружного и внутреннего колец друг относительно друга в радиальном направлении [11], [12]. При выборе нормальной группы начальный стандартный зазор в подшипнике изменяется в некотором диапазоне. При этом относительное радиальное смещение колец подшипника при незначительной радиальной нагрузке составит половину начального стандартного зазора. После монтажа узла зазор уменьшается за счет посадки одного из колец подшипника с натягом. При работе узла за счет влияния температурных деформаций в подшипнике реализуется рабочий зазор, который обычно меньше, чем монтажный, поэтому в дальнейшем расчете необходимо делать корректировку с учетом и этого фактора.

#### **Методика расчета перемещений в фиксирующей опоре редуктора**

Расчет перемещений в опорах качения целесообразно выполнить по классическим зависимостям, которые учитывают закон распределения нагрузки между телами качения, зазор и деформации тел качения под нагрузкой. Для радиального подшипника деформация  $S_\psi$  в двух зонах контакта с дорожками качения с учетом зазора  $\delta_0$  в подшипнике, равного половине стандартного зазора, определяемого в диаметральном выражении, установлена из условия совместности деформаций и перемещений в виде [11]:

$$S_\psi = \delta_r \cos \psi - \delta_0 = S_{\max} [1 - 0,5(1 - \cos \psi)/\varepsilon], \quad (5)$$

где  $\delta_r$  — радиальное перемещение внутреннего кольца подшипника относительно наружного в направлении действия радиальной нагрузки;  $\psi$  — угол между направлением радиальной нагрузки и положением тела качения;  $S_{\max} = \delta_r - \delta_0$  — деформация наиболее нагруженного тела качения при  $\psi = 0$ .

Безразмерный параметр, используемый для расчета перемещений в радиальном подшипнике, составляет

$$\varepsilon = 0,5(1 - \delta_0/\delta_r) = 0,5S_{\max}/(S_{\max} + \delta_0). \quad (6)$$

При увеличении угла  $\psi$  деформация тел качения уменьшается и на границе зоны нагружения становится равной нулю, т. е.  $S_\psi = 0$  при  $\psi = \Psi$ . Угол половины зоны нагружения является функцией параметра  $\Psi = \arccos(1 - 2\varepsilon)$ .

Если параметр  $\varepsilon \geq 1$ , то нагрузку воспринимают все тела качения. Этот случай соответствует созданию в подшипнике предварительного натяга ( $\delta_0 \leq 0$ ). Если зазор или натяг в подшипнике отсутствует, то безразмерный параметр принимает значение  $\varepsilon = 0,5$ . При величине параметра  $\varepsilon = 0,5$  радиальная нагрузка воспринимается половиной общего числа тел качения ( $\psi = \pi/2$ ).

Значения  $\varepsilon < 0$  соответствуют условию  $\delta_r < \delta_0$ , при котором тела качения не вступают в контакт, и подшипник не воспринимает нагрузки. Максимальная нагрузка на тело качения в радиальном подшипнике рассчитывается на основании решения задачи о распределении нагрузки между телами качения с использованием интегральной функции  $J_r(\varepsilon)$  параметра  $\varepsilon$  и составляет  $Q = F_r/[zJ_r(\varepsilon)]$ .

Функция  $J_r(\varepsilon)$  показана на рис. 4. Утолщенной линией выделены значения интегральной функции  $J_r(\varepsilon)$  для подшипников, в которых имеется радиальный зазор. Для радиальных шариковых подшипников с зазором при  $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,5$  установлена приближенная аппроксимирующая формула

$$J_r(\varepsilon) \approx 0,07 + 0,52\varepsilon - 0,41\varepsilon^2. \quad (7)$$

Деформация наиболее нагруженного тела качения радиального шарикового подшипника составляет

$$S_{\max} = 4 \cdot 10^{-4} Q^{2/3} / D_w^{1/3}. \quad (8)$$

Радиальное относительное перемещение  $\delta_r$  внутреннего кольца подшипника относительно наружного в направлении действия радиальной нагрузки следует выразить в виде функции параметра  $\varepsilon$ :

$$\delta_r = S_{\max} + \delta_0 = 0,5S_{\max} / \varepsilon. \quad (9)$$

При заданной внешней нагрузке  $F_r$  на опору параметр  $\varepsilon$  определяется методом итераций по алгоритму, составленному для шарикового радиального подшипника.

В качестве второй опоры барабана рассматривается самоустанавливающийся роликовый подшипник. При расчете по итерационному алгоритму для роликовых опор аппроксимирующая функция для интегральной функции была определена в виде

$$J_r(\varepsilon) \approx 0,1 + 0,42\varepsilon - 0,27\varepsilon^2. \quad (10)$$

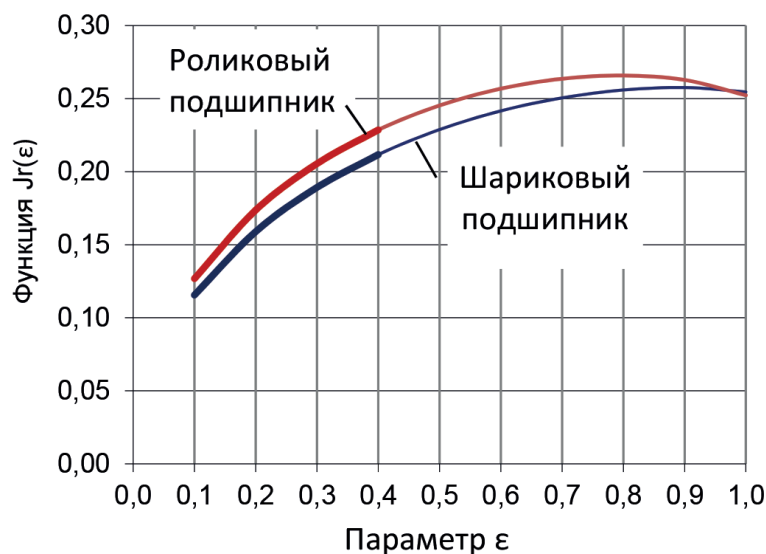


Рис. 4. Значения интегральной функции  $J_r(\varepsilon)$  для радиальных подшипников

Деформация наиболее нагруженного тела качения двухрядного сферического подшипника  $S_{\max}$ , мм, рассчитывается по формуле

$$S_{\max} = 2 \cdot 10^{-4} Q^{3/4} / (L_w^{1/2} \cos \alpha), \quad (11)$$

где  $\alpha$  — угол контакта.

Относительные смещения колец в опорах барабана сопровождаются перекосом оси барабана относительно оси водила тихоходной ступени на угол

$$\gamma_{\delta} = (\delta_{rA} + \delta_{rB}) / (L - a + b). \quad (12)$$

## Результаты (Results)

Пример расчета максимальной нагрузки на тело качения в радиальном подшипнике в среде MathCAD показан в виде следующей принятой формы.

### РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ТЕЛО КАЧЕНИЯ В РАДИАЛЬНОМ ПОДШИПНИКЕ

#### 1. Исходные данные для расчета

$$R_0 := 350000 \quad z := 20 \quad D_w := 8 \quad \delta_o := 0.028$$

#### 2. Интегральная функция параметра зазора

Начальное приближение  $\varepsilon_o := 0.3$

Интегральная функция параметра зазора

для шарикового радиального подшипника  $J := 0.07 + 0.52 \cdot \varepsilon_o - 0.41 \cdot \varepsilon_o^2$

#### 3. Максимальная нагрузка на тело качения

$$Q := \frac{R_0}{z \cdot J} \quad Q = 92543.628$$

#### 4. Проверка безразмерного параметра

Деформация наиболее нагруженного тела качения

$$s_{\max} := \frac{0.0004 Q^{\frac{2}{3}}}{D_w^{\frac{1}{3}}} \quad s_{\max} = 0.409$$

Расчетное относительное перемещение колец:

$$\delta_r := s_{\max} + \delta_o \quad \delta_r = 0.437$$

Параметр, при котором расчетное относительное перемещение колец

достаточно

$$\varepsilon_1 := \frac{0.5 \cdot s_{\max}}{s_{\max} + \delta_r} \quad \varepsilon_1 = 0.24173$$

Модуль относительной разности:

$$\Delta \varepsilon := \left| \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_1}{\varepsilon_o} \right| \quad \Delta \varepsilon = 0.194$$

$$\varepsilon_{o1} := \begin{cases} \varepsilon_o & \text{if } \Delta \varepsilon \leq 0.01 \\ \varepsilon_1 & \end{cases} \quad \varepsilon_1 = 0.242$$

$$\varepsilon_{o1} = 0.242$$

#### Второе приближение

$$J_1 := 0.07 + 0.52 \cdot \varepsilon_{o1} - 0.41 \cdot \varepsilon_{o1}^2 \quad Q_1 := \frac{R_0}{z \cdot J_1} \quad Q_1 = 101897.175$$

$$s_{\max 1} := \frac{0.0004 Q_1^{\frac{2}{3}}}{D_w^{\frac{1}{3}}}$$

$$\delta_{r1} := s_{\max 1} + \delta_o$$

$$\varepsilon_{11} := \frac{0.5 \cdot s_{\max 1}}{s_{\max 1} + \delta_{r1}}$$

$$\varepsilon_{11} = 0.242228$$

$$\Delta \varepsilon_1 := \left| \frac{\varepsilon_{o1} - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{o1}} \right|$$

$$\Delta \varepsilon_1 = 0.002$$

Модуль относительной разности менее 0.01. Расчет заканчивается

Проведенные вычисления показывают, что относительная погрешность определения параметра  $\varepsilon$  составляет не более 1 % уже после двух-трех итераций. Результаты вычисления реакции опоры и смещения колец подшипника в зависимости от положения троса на образующей барабана приведены на рис. 5.

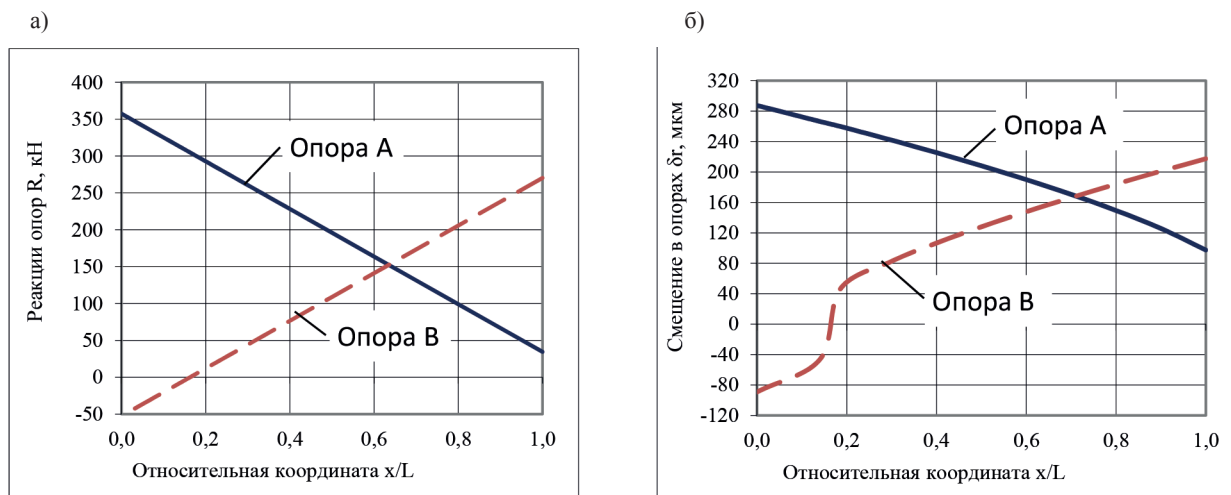


Рис. 5. Зависимость реакций опор (а) и смещений в опорах (б) от положения троса на образующей барабана

Зависимость угла перекоса оси барабана от положения троса на образующей барабана показана на рис. 6. Когда трос находится в крайнем левом положении, на образующей барабана ( $x/L = 0$ ) достигается максимальная величина угла перекоса оси барабана  $\gamma_6$ . Этот угол перекоса сопровождается отклонением положения контактных линий на зубьях центральных колес тихоходной ступени относительно номинального положения на величину  $\Delta f_{ky} = b_w \gamma$ .

Влияние отклонения  $\Delta f_{ky}$  на начальную неравномерность распределения нагрузки по ширине зубчатого венца, в соответствии с ГОСТ 21354-87, рассчитывается по формуле

$$\Delta K = 0,4b_w \Delta f_{ky} c' \cos \alpha_{tw} / (F_t K_A K_{\Omega} Z_{\varepsilon}^2).$$

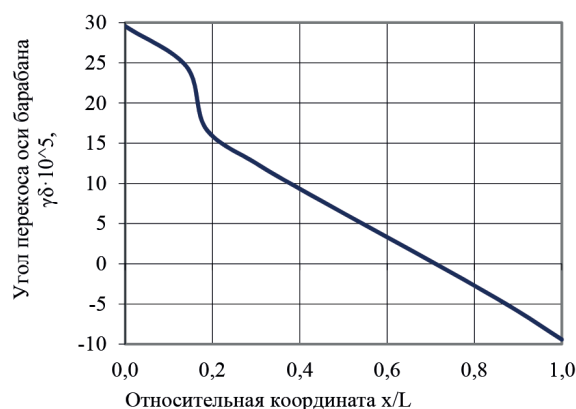


Рис. 6. Зависимость угла перекоса оси барабана от положения троса на образующей барабана

При относительной координате  $x/L = 1$ , когда трос находится в крайнем правом положении на образующей барабана, реализуется минимальная величина угла перекоса оси барабана  $\gamma_6$ . Изменение знака отклонения  $\Delta f_{ky}$  и коэффициента  $\Delta K$  соответствует смещению зоны концентрации удельной нагрузки к противоположному торцовому сечению.

Пример расчета показал, что значение  $\Delta K$  может достигать  $\approx 0,2$ . Это указывает, что смещение колец подшипниковых опор барабана приводит к относительно невысокому повышению неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатых венцов в зацеплениях центральных колес тихоходной ступени.



На угол перекоса оказывают влияние и перемещения в опорах барабана, и монтажный перекося оси барабана. Если монтажный перекося барабана имеет случайный характер, то влияние перемещений в опорах требует отдельного рассмотрения. С повышением угла перекося осей повышается также и коэффициент неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца передачи  $K_{нр}$ . В заключение следует отметить, что изготовление планетарных редукторов требует высокой культуры производства, поскольку низкая степень точности зубчатых передач, низкий уровень сборки и монтажа наряду с деформациями основных звеньев могут вызывать дополнительные недопустимые перекося осей зубчатых колес планетарного ряда.

### Заключение (Conclusion)

1. Проведенный в статье структурный анализ показал, что конструкция встроенного планетарного редуктора компаний, являющихся лидерами мирового машиностроения (в частности, компаний *Brevini*, *Zollern*, *Siebenhaar*), выполнена на базе хорошо известной и изученной в отечественной литературе обобщенной схемы. Выявлена возможность оптимизации конструкции.

2. Энергетический анализ показал, что данная структурная схема относится к классу двухконтурных многопоточных последовательных, причем мощность в каждом контуре раздваивается и передается двумя потоками, суммируясь на ведомом валу, что выгодно с энергетической точки зрения. Поэтому нужно разрабатывать такие многопоточные схемы, в которых заведомо известны потоки мощности в их различных ветвях, а в схеме отсутствует циркуляция мощности.

3. В статье впервые изучено влияние положения троса на образующей барабана на нагрузочную способность зацеплений редуктора. Выполнен расчет радиальных перемещений в опорах барабана в зависимости от величины нагрузки, радиального зазора и деформации тел качения подшипников с учетом закона распределения нагрузки между телами качения.

4. Предложен метод итераций, позволяющий по заданной внешней радиальной нагрузке на опору определить максимальную нагрузку на тело качения по алгоритму, который составлен для шарикового радиального подшипника в среде Mathcad. Алгоритм полностью переносится и на роликовые радиальные подшипники заменой вида функции безразмерного параметра деформаций.

5. Реализация рассмотренных в статье вопросов позволила ОАО «ЗАРЕМ» выполнить заказ на проектирование и изготовление планетарных редукторов для судовых кранов с обеспечением требования уменьшенного габаритного размера лебедки в осевом направлении и соблюдения патентной чистоты изделия.

*Автор статьи выражает огромную благодарность своему научному руководителю доктору технических наук профессору А. Л. Филипенкову за совместную работу и ценные советы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Е. Н. Общие вопросы проектирования схем конкурентоспособных распределительных механизмов крановых и судовых приводов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 118–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-118-126.
2. Андрианов Е. Н. Исследование свойств дифференциальных механизмов с точки зрения функционирования в специальных судовых и крановых приводах / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 165–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-165-175.
3. Планетарные редукторы Brevini. Каталог продукции. Версия 1.0. — ЗАО «НТЦ Приводная Техника», 2003.
4. Пыж О. А. Редукторы судовых турбоагрегатов / О. А. Пыж, Л. М. Гаркави, Ю. А. Державец, Р. Р. Гальпер. — Л.: Судостроение, 1975. — 272 с.

5. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи: справочник / В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Ю. А. Дер-  
жавец [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
6. Барышников С. О. Обзор методов представления структуры зубчатых механизмов / С. О. Барыш-  
ников, А. Н. Иванов // Морской вестник. — 2011. — № 2. — С. 108–110.
7. Иванов А. Н. Структурные соотношения в планетарных коробках передач с любым числом степе-  
ней свободы / А. Н. Иванов // Известия высших учебных заведений. — 1970. — № 7. — С. 50–54.
8. Кирдяшев Ю. Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов / Ю. Н. Кирдяшев, А. Н. Ива-  
нов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 352 с.
9. Шабанов К. Д. Двухпоточные передачи транспортных машин / К. Д. Шабанов. — М.: Машгиз,  
1962. — 127 с.
10. Филипенков А. Л. Планетарные редукторы, встраиваемые в барабаны грузовых лебедок судовых  
кранов / А. Л. Филипенков, А. К. Пшизов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. — 2017. — Т. 20. —  
№2. — С. 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.
11. Eschmann P. Ball and roller bearings. Their theory, design and application / P. Eschmann, Weigand,  
L. Hasbargen. — München: Oldenbourg, 1958. — 375 p.
12. Harris T. A. Rolling Bearings Analysis / T. A. Harris. — New York, 1966. — 468 p.

## REFERENCES

1. Andrianov, Evgenij Nikolaevich, and Anatolij Nikolaevich Ivanov. “General design issues of competitive  
schemes of distribution mechanisms of the crane and ship drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo  
i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 118–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-118-126.
2. Andrianov, Evgenii N., and Anatoly N. Ivanov. “The study of differential mechanisms from the point of  
view of functioning in the ship and crane drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota  
imeni admirala S.O. Makarova* 9.1(2017): 165–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-165-175.
3. *Planetarnye reduktory Brevini. Katalog produktsii. Versiya 1.0.* ZAO «NTTs Privodnaya Tekhnika», 2003.
4. Pyzh, O.A., L.M. Garkavi, Yu.A. Derzhavets, and R.R. Gal'per. *Reduktory sudovykh turboagregatov.* L.:  
Sudostroenie, 1975.
5. Kudryavtsev, V.N., Yu.N. Kiryashev, Yu.A. Derzhavets, et al. *Planetarnye peredachi: spravochnik.* L.:  
Mashinostroenie, 1977.
6. Baryshnikov, S.O., and A.N. Ivanov. “Obzor metodov predstavleniya struktury zubchatykh mekhanizmov.”  
*Morskoi vestnik* 2(2011): 108–110.
7. Ivanov, A.N. “Strukturnye sootnosheniya v planetarnykh korobkakh peredach s lyubym chislom stepenei  
svobody.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii* 7(1970): 50–54.
8. Kiryashev, Yu.N., and A.N. Ivanov. *Proektirovanie slozhnykh zubchatykh mekhanizmov.* L.: Mashi-  
nostroenie, 1973.
9. Shabanov, K.D. *Dvukhpotochnye peredachi transportnykh mashin.* M.: Mashgiz, 1962.
10. Filipenkov, A.L., and A.K. Pshizov. “Integrated planetary gearboxes for hoisting winches in shipboard  
cranes”. *Journal of the Izhevsk State Technical University* 20.2(2017): 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.
11. Eschmann, P., Weigand, and L. Hasbargen. *Ball and roller bearings. Their theory, design and application.*  
München: Oldenbourg, 1958.
12. Harris, T.A. *Rolling Bearings Analysis.* New York, 1966.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Пшизов Айдамир Казбекович** —  
ведущий инженер-конструктор КБ  
ОАО «ЗАРЕМ»  
385000, Российская Федерация, г. Майкоп,  
ул. Шовгенова, 362  
e-mail: aydamir\_01@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Pshizov, Aydamir K.** —  
Principal design engineer  
OJSC “ZAREM”  
362 Shovgenova Str., Maykop, 385000,  
Russian Federation  
e-mail: aydamir\_01@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.  
Received: December 15, 2017.

## METHODS OF DESIGN OF SPECIAL INTEGRATED PLANETARY GEAR UNITS OF MARINE AND CRANE DRIVES

**E. N. Andrianov, A. N. Ivanov, E. V. Matveeva**

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

*The paper is devoted to the design of embedded planetary gears, which were included in the design practice in recent years and are used in the creation of competitive cars both Russian and foreign designers, have defined limits on the location of working links, causing a possible set of solutions and the type of planetary mechanism. Based on the theory of bipartite graphs defined by the equations of the unified theory, which have to be molded structure suitable for the formation of planetary gearboxes, are fully embedded in the actuator of the ship and crane mechanisms. Based on the solution of the equations of a unified theory of the structure shows a method of constructing schemes of built-in reducers. The scheme is formed by combinatorial method of production structure in various ways on working links. For allocation on the basis of the block diagram of a plurality of kinematic diagrams of gearboxes used graphical method of construction of areas of admissible solutions. When constructing the kinematic schemes used in the method of conceptual schemes. For the construction of gearboxes, suitable for installation in rope drum, constraints on the location of working links. The proposed method is a simple calculated dependence, determining the transmission gear ratio through the parameters of the mechanisms, forming a complex structure. Created entire set of kinematic schemes, which should be taken into account in the selection of a rational solution. Among the resulting aggregate of two-stage reducers found schema that is different from the structures of European manufacturers of inline gear reducers, driven catalogues Brevini companies, Zollern, Siebenhaar, etc.*

*Keywords: built-in gearbox, drum, winch, anchor-mooring spire, the planetary gear set, differential, structure, bipartite graph, gear ratio, the area of allowable solutions.*

**For citation:**

Andrianov, Evgenii N., Anatoly N. Ivanov, and Elena V. Matveeva. "Methods of design of special integrated planetary gear units of marine and crane drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 10.1 (2018): 50–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-50-61.

**УДК 621. 830. 62**

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВСТРОЕННЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ СУДОВЫХ И КРАНОВЫХ КАНАТНЫХ ЛЕБЕДОК

**Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов, Е. В. Матвеева**

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

*В статье рассмотрены конструкции встроенных планетарных редукторов, которые вошли в конструкторскую практику в течение последних лет и используются при создании конкурентоспособных машин как российскими, так и зарубежными проектировщиками, определены ограничения на расположение рабочих звеньев, обуславливающие возможное множество решений и используемый тип планетарного механизма. На основе теории двудольных графов определены уравнения единой теории, которым должна отвечать формируемая структура, пригодная для образования планетарных редукторов, полностью встроенных в исполнительное устройство судовых и крановых механизмов. На основе решения уравнений единой теории структуры показана методика построения схем встроенных редукторов. Схемы образованы комбинаторным методом постановки структуры различными способами на рабочие звенья. Для выделения на базе данной структурной схемы множества кинематических схем редукторов использован графический метод построения областей допустимых решений. При построении кинематических схем используется метод эскизных схем. Для разработки конструкций редукторов, пригодных для встраивания в канат-*

ный барабан, учитываются ограничения на расположение рабочих звеньев. Предложен способ получения простых расчетных зависимостей, определяющих передаточное отношение редуктора через параметры механизмов, образующих сложную структуру. Создана совокупность кинематических схем, которую следует принимать во внимание при выборе рационального решения. В числе полученной совокупности двухступенчатых редукторов найдены схемы, отличающиеся от конструкций европейских производителей встроенных редукторов, приводимых в каталогах компаний Brevini, Zollern, Siebenhaar и др.

**Ключевые слова:** встроенный редуктор, барабан, лебедка, якорно-швартовный шпиль, планетарный ряд, дифференциал, структура, двудольный граф, передаточное отношение, область допустимых решений.

#### Для цитирования:

Андрианов Е. Н. Методика проектирования схем специальных встроенных планетарных редукторов судовых и крановых канатных лебедок / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов, Е. В. Матвеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 50–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-50-61.

### Введение (Introduction)

В настоящее время определенный интерес у российских разработчиков судовых и крановых механизмов вызывают специализированные редукторы, полностью встраиваемые в монтажное пространство исполнительных устройств. Известные отечественные фирмы сегодня устанавливают их в новые машины, например, в канатные барабаны лебедок крановых механизмов. Существует настоятельная необходимость в их использовании также и при создании отечественного оборудования для шельфовых проектов, поскольку добыча углеводородов на шельфе становится приоритетной задачей для нашей страны, а инвестиции в эти проекты оцениваются в триллионы рублей. Данное обстоятельство отмечалось на совещании ассоциации производителей оборудования «Новые технологии газовой отрасли», проведенном в сентябре 2017 г. на ОАО «Ижорские заводы» в Колпино.

С другой стороны, несмотря на высокую стоимость производства планетарных редукторов и проведенные мероприятия по повышению КПД рядовых передач, применение встроенных редукторов расширяет области эффективного применения планетарных передач, реализуя важные ожидаемые преимущества, определяемые компоновкой и спецификой работы.

Традиционно силовой привод выполняют по схеме *двигатель — редуктор — исполнительное устройство*. Примеры схем такого типа представлены на рис. 1.

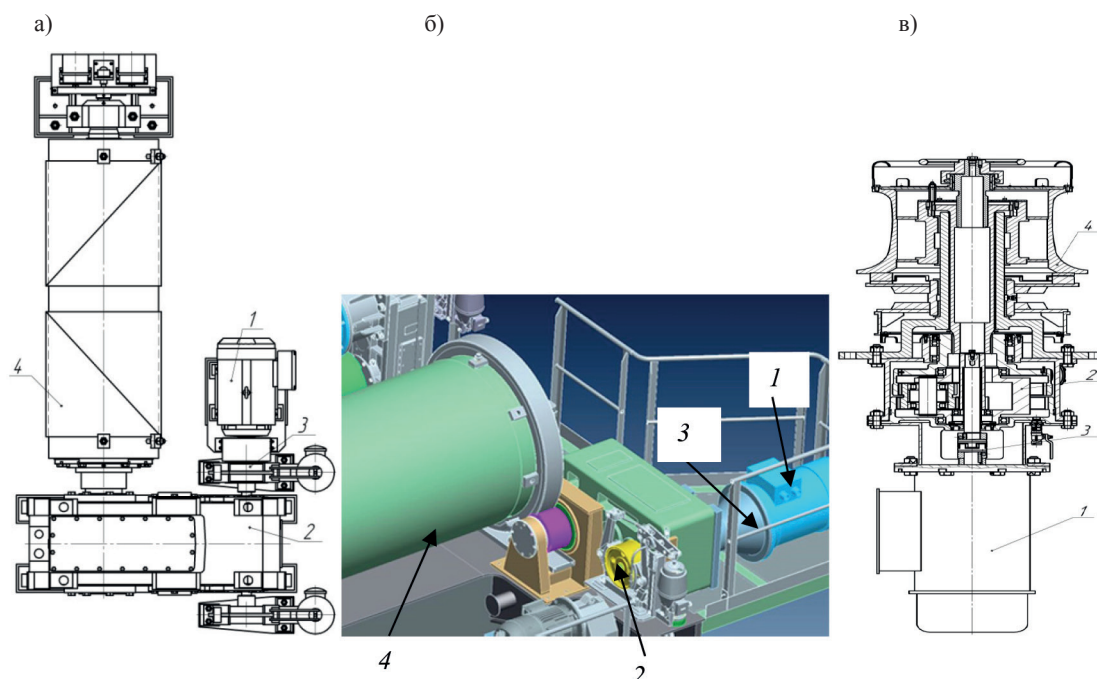


Рис. 1. Традиционные варианты компоновки привода:

а — лебедка подъема с цилиндрическим редуктором;

б — лебедка с двигателем, подключенным к редуктору через адаптер 3; в — якорно-швартовный шпиль



Обычно двигатель 1 соединен при помощи упругой муфты 3 с входным валом редуктора 2. В конструкции на рис. 1, а муфта снабжена тормозным шкивом и комплектуется колодочным тормозом. В конструкции на рис. 1, б двигатель и редуктор выполнены в виде отдельного блока. Исполнительное устройство 4 во всех конструкциях соединено с выходным валом редуктора. Не обладая компактностью, компоновка изделия из унифицированных узлов сокращает сроки проектирования и удобна для обслуживания и ремонта. В судовой конструкции якорно-швартовного шпиля (рис. 1, в) в качестве передаточного механизма применен планетарный механизм 3, который хоть и воспроизводит большие передаточные отношения, но обладает невысоким КПД и невысоким качеством точности механики.

Значительно уменьшить габариты конструкции позволяют компоновочные схемы, в которых валы двигателя и передаточного механизма, встроенного в исполнительное устройство, имеют соосное расположение. В отечественном машиностроении остается распространенной традиционная конструкция со встроенными элементами привода, которая особенно часто применяется в палубных механизмах, а также в механизмах подъема, изменения вылета и поворота многих судовых кранов (рис. 2, а). Примерами являются судовой кран г/п 3,2 т (кран КЭ32-2), кран г/п 8/3,2 т и др. [1], [2]. Как и в конструкции на рис. 1, в, в указанных схемах используется планетарный механизм 3К, причем в устройство встроены элементы, являющиеся неотъемлемой частью исполнительного механизма, а не редуктора. Такое решение представляет определенные неудобства при монтаже и ремонте изделия.



Рис. 2. Два подхода к созданию встроенных приводов:

- а — в грузовую лебедку (например, ЛЭ70) встроены только элементы редуктора;
- б — редуктор, полностью встроенный в барабан лебедки;
- в — редуктор 1, полностью установленный в головку 2 якорно-швартовного шпиля

В основе последних прогрессивных соосных компоновок передаточный механизм полностью встраивается в исполнительное устройство (рис. 2, б и в). Такие устройства, отличаясь целым рядом преимуществ, а именно: компактностью конструкции, высоким КПД, удобством ремонта, широким диапазоном трансформации момента и другими преимуществами, потребовали создания специального производства редукторов. Рядом европейских компаний была разработана линейка подобных конструкций, которая затем была предложена для продажи на внешний рынок. Однако поставки в Россию импортного оборудования, в частности для глубоководной добычи углеводородов, в настоящее время запрещены из-за санкций, поэтому упор делается на применение отечественных разработок.

Практика проектирования машин теперь такова, что надо не выбирать готовый редуктор, а проектировать и изготавливать новый. Однако возможности для внедрения в отечественные разработки подобных конструкций оказываются ограниченными. Правда, ориентируясь на опыт отечественных разработок в смежных областях, например, подобных тем, что используются в устройстве мотор-колеса автомобилей-самосвалов БелАЗ моделей 7519 и 75191 [3], можно создавать аналогичные проекты. Тем не менее недостаточная исследованность вопроса в проектировании не позволяет разрабатывать оригинальные проекты, которые на шаг опережают предложенные



решения. Подтверждением может служить схемно-конструктивное решение редуктора (рис. 3, а), [4]. В предложенной конструкции, в отличие от конструкций ранее указанных известных мировых компаний, в которых с корпусом редуктора связаны эпициклы всех планетарных рядов (см. рис. 3, б), с корпусом 1 связан эпицикл только одного планетарного ряда. Поэтому в случае применения его, например, в устройстве мотор-колеса для проведения монтажа и демонтажа достаточно снять крышку 2, открывающую доступ внутрь редуктора. Конструкция по рис 3, а, а также конструкции редукторов, предложенные отечественными производителями [5], указывают на наличие иных конструктивных решений, а значит, существует необходимость иметь всю совокупность структур, из которой следует производить выбор оптимальной структуры. Наличие подобной совокупности структур позволит исключить элементы случайности при разработке конструкции и принять правильное решение о дальнейших действиях.

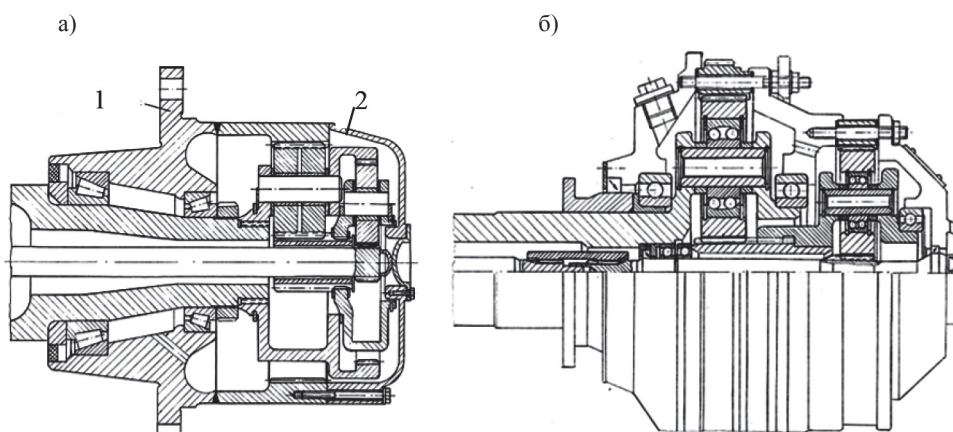


Рис. 3. Конструкции специальных редукторов: а — редуктор с опорным звеном, входящим в один механизм; б — редуктор с опорным звеном, входящим в оба механизма

### Основная часть (Main Part)

Приведенные ранее конструкции встроенных редукторов показывают что, во-первых, они конструируются на базе дифференциала  $2kh$  типа А, имеющего две степени свободы и три основных звена (два центральных колеса  $a, b$  и одно водило  $h$ ) [6], во-вторых, конструкция накладывает ограничение на выходы рабочих звеньев (входное, выходное и опорное), в третьих, конструкции имеют вращающийся корпус, и, в-четвертых, с вращающимся корпусом связаны эпициклы (короны) всех дифференциалов.

Рассмотрим вопрос формирования структур механизма планетарных редукторов. Следуя рекомендациям работы [7], при описании структуры будем использовать двудольные графы.

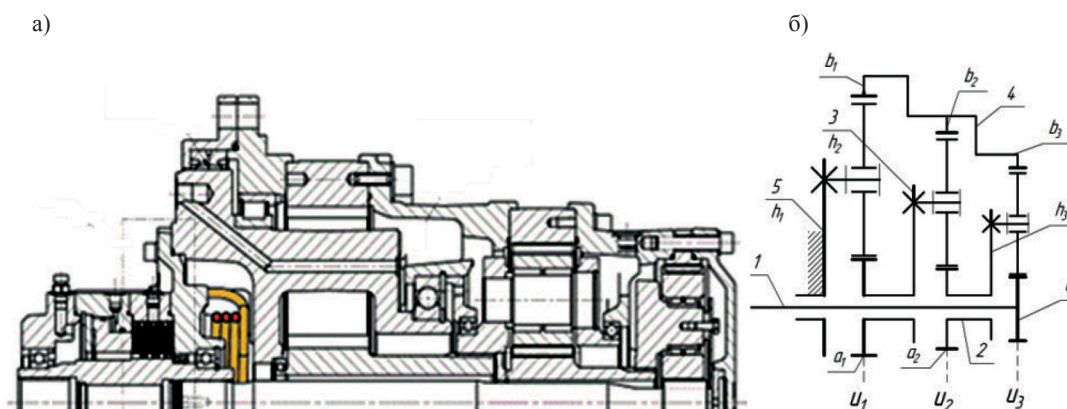


Рис. 4. Формирование структуры планетарных механизмов:  
а — конструкция трехступенчатого стандартного редуктора известных мировых компаний;  
б — кинематическая схема механизма редуктора

В качестве примера двудольный (бихроматический) граф редуктора (рис. 4) изображен на рис. 5, б. В двудольном графе (рис. 5, б) светлым кружком отмечены вершины, отображающие дифференциалы, образующие множество  $X^m$ , а темным кружком отмечены вершины, отображающие основные звенья, создающие множество  $X^z$ . Ребра двудольного графа соединяют вершины-звенья  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  с вершинами, отображающими дифференциалы  $u_1, u_2, u_3$ . Обозначается двудольный граф  $G = (X^z, X^m, U)$ , причем  $X^z \cup X^m = X$ ,  $X^z \cap X^m = \emptyset$ , а ребра  $U$  соединяют только подмножества  $X^z$  и  $X^m$  между собой [8]. Заметим, что применение гиперграфов [9] не дает решения поставленной задачи.

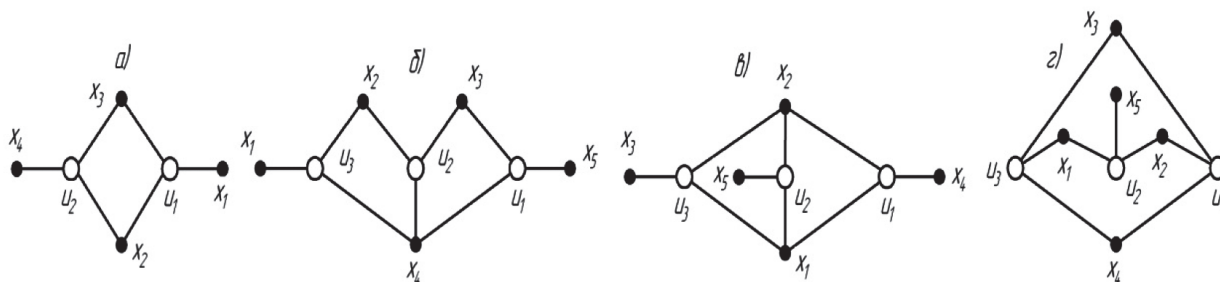


Рис. 5. Полное множество структур механизмов редуктора:  
а — двухступенчатого; б, в, г — трехступенчатого

Поставим условия, которым должна отвечать формируемая структура. Для каждого сложного зубчатого механизма существуют определенные соотношения между числами составляющих трехзвенных (далее простых) дифференциалов, рабочих и вспомогательных звеньев и степенью сложности звеньев. До вхождения в редуктор  $k_m$  простых дифференциалов обладают  $2k_m$  числом степеней свободы и имеют  $3k_m$  основных звеньев. После наложения связей сложный механизм будет иметь  $W$  степеней свободы и  $n_o$  основных звеньев. Тогда общее число связей

$$\left. \begin{aligned} S &= 2k_m - W; \\ S &= 3k_m - n_o. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Заметим, что данный вопрос изучался в работе [10], в которой  $S = c + 1$ , где  $c$  — число связей звеньев между собой; 1 — число закреплений в корпусе. К сожалению, данное решение не дает возможности раскрыть связи в структуре редуктора. Приравнявая правые части уравнений (1), найдем число основных звеньев, которое будет содержать механизм редуктора после наложения связей:

$$n_o = k_m + W. \quad (2)$$

Звенья в редукторе отличаются числом дифференциалов, которым они принадлежат. В соответствии с этим будем различать *простые* и *сложные* (двойные, тройные и т. д.) звенья. В схеме на рис. 5, а основные звенья 1 и 5 — простые; 2 и 3 — двойные; 4 — тройное звено. Обозначим число простых, двойных, ...,  $i$ -х звеньев как  $n_1, n_2, n_i$ . Очевидно, что сумма звеньев разной сложности равна числу основных звеньев в редукторе:

$$\sum n_i = n_o. \quad (3)$$

Число ребер графа, которым принадлежит вершина (звено), называется *степенью вершины*, которую упрощенно будем обозначать как  $s(x)$ . У графа на рис. 5, б:  $s(x_1) = s(x_5) = 1$ ;  $s(x_2) = s(x_4) = 2$ ;  $s(x_3) = 3$ ;  $s(u_1) = s(u_2) = s(u_3) = 3$ . Очевидно, что наибольшая степень вершины звена не может превышать  $|X^m| = k_m$ , т. е.

$$\max s(x) = k_m. \quad (4)$$

Так как в двудольном графе каждое ребро имеет один конец в  $X^z$  а другой в  $X^m$ , сумма степеней вершин множества  $X^z$  равна сумме степеней множества  $X^m$  и с учетом условия (4) получим

$$\sum_1^{k_m} s(x_i) n_i = 3k_m. \quad (5)$$

Таким образом, система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum n_i &= k_m + W; \\ \sum_1^{k_m} s(x_i) n_i &= 3k_m, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

позволяет ответить на ранее сформулированный вопрос о том, *каким условиям должна отвечать формируемая структура и какую степень должны иметь вершины-звенья той или иной структуры механизма редуктора*. В частности, для двухступенчатых механизмов  $k_m = 2$  и  $W = 2$  получим систему, состоящую из двух уравнений:  $n_1 + n_2 = 4$  и  $n_1 + 2n_2 = 6$ , которая имеет одно решение в целых числах:  $n_1 = 2, n_2 = 2$  (рис. 6, а). Для трехступенчатых механизмов  $k_m = 3$  и  $W = 2$  тоже получим систему, состоящую из двух уравнений:  $n_1 + n_2 + n_3 = 5$  и  $n_1 + 2n_2 + 3n_3 = 9$ , имеющую три решения в целых числах: 1)  $n_1 = 2, n_2 = 2, n_3 = 1$ ; 2)  $n_1 = 3, n_3 = 2$ ; 3)  $n_1 = 1, n_2 = 4$ , которым отвечают структуры, изображенные, соответственно, на рис. 5, б – г.

По данным результатам для краткости изложения вопроса дальнейшее исследование рассмотрим на примере построения схем двухступенчатых редукторов. Вначале остановимся на вопросе образования структурных схем планетарных редукторов и построения связей между передаточными отношениями их механизмов. Для составления схемы в полученные структуры следует ввести обозначения трех рабочих звеньев: входного  $A$ , выходного  $B$ , опорного  $\gamma$ . В структуре рис. 5, а рабочими звеньями могут быть лишь простые звенья  $x_1, x_4$  и одно любое двойное, например,  $x_2$ . Переименовать три звена можно шестью способами (подстановками):

$$\left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ A \gamma B \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ A B \gamma \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ B A \gamma \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ B \gamma A \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ \gamma A B \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} x_1 x_2 x_4 \\ \gamma B A \end{matrix} \right).$$

Каждая подстановка заключается в том, что на место символа, стоящего в верхней строчке, ставится подписанный под ним символ из нижней строчки. Учитывая, что  $x_1$  и  $x_4$  являются эквивалентными звеньями, различны лишь первые три подстановки. Таким образом, на базе структуры рис. 6, а получим три различные схемы (см. рис. 6), каждая из которых содержит  $\sigma(\pi, k_m) = \pi^{k_m} = 6^2 = 36$  кинематических схем, где  $\pi$  — число схем, реализуемых на базе одного механизма  $2kh$ , среди которых имеются как редукторы, так и мультипликаторы.

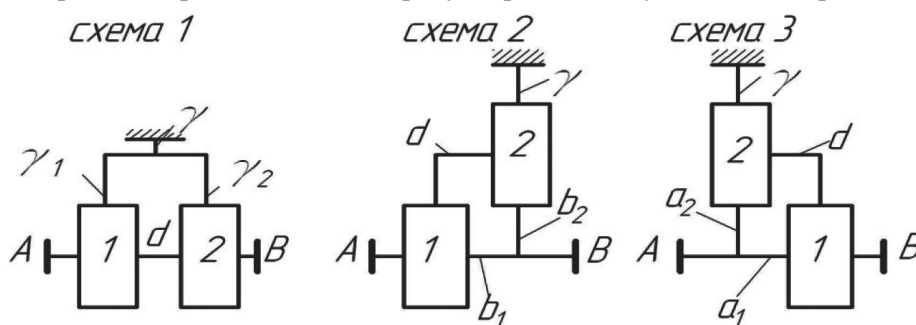


Рис. 6. Структурные схемы двухступенчатых редукторов

Кинематические связи между передаточными отношениями трехзвенных механизмов более целесообразным представляется определять методом последовательного преобразования структурной схемы, превращающего исходную (в общем случае многоконтурную структуру) в такую, где трехзвенные механизмы соединены последовательно друг с другом.

*Схема 1.* Конструкция образована последовательным соединением двух однорядных механизмов, поэтому ее передаточное отношение запишется как произведение:  $i_{AB}^y = i_{Ad}^y i_{dB}^y$ . Обозначив для краткости  $i_{Ad}^y = i_d$ ,  $i_{dB}^y = i_e$ , т. е. обозначив передаточные отношения механизмов номером и опуская нижние символы в обозначении  $i_{AB}^y$ , можно записать

$$i^y = i_d i_e. \quad (7)$$

*Схема 2.* Записывая для нее очевидное равенство:  $i_{AB}^y = 1 - i_{A\gamma}^B$ , в котором передаточное отношение  $i_{A\gamma}^B$  образовано последовательным соединением двух однорядных механизмов:  $i_{A\gamma}^B = i_{Ad}^B i_{d\gamma}^B$  и обозначая  $i_{Ad}^B = i_d$ ,  $i_{d\gamma}^B = i_e$ , находим

$$i^y = 1 - i_d i_e. \quad (8)$$

*Схема 3.* Поступая аналогично схеме 2, окончательно можем записать

$$i^y = 1/(1 - i_d i_e), \quad (9)$$

где, соответственно,  $i_d = i_{Bd}^A$ ,  $i_e = i_{de}^A$ .

Переход от структурной схемы к схеме кинематической выполняют разными способами. В работе [11] данные структуры найдены комбинаторным методом и записаны буквенно-цифровым кодом, а построение схем для каждой из трех структур, ведется в системе координат  $i_d O i_e$ , определяемой множеством прямоугольников, на которое накладывают уравнение, отвечающее заданному передаточному отношению. Проектирование схем с помощью областей рационального существования трехзвенных механизмов, входящих в исследуемую структуру, с указанием, какое звено является водилом, а какие — центральными колесами, выполняется в работе [12]. Комбинаторный метод синтеза кинематических схем предлагается в работе [13]. В работе [14] построение схем предлагается выполнять с помощью матрицы, определяющей кинематические свойства механизма, причем матрица не должна включать равносильных или несовместных уравнений. Данные предложения не позволяют рассматривать всевозможные решения, а лишь формируют полное множество схем для конкретных условий. С учетом указанного обстоятельства в данной статье предлагается вести построение кинематических схем с помощью нахождения областей допустимых решений для каждой конкретной структурной схемы на основе полученных уравнений (7) – (9) с использованием графических построений.

При использовании трехзвенных механизмов в качестве самостоятельных передач возможны шесть схем подключения рабочих звеньев  $A, B, \gamma$  к звеньям  $a, b$  и  $h$ . Под каждым вариантом указаны интервалы реализуемых схемой передаточных отношений (передаточное отношение от звена  $a$  к звену  $b$  в движении относительно водила  $h$  принято в интервале  $-1,6 \geq i_{ab}^h \geq -7$ ):

| 1)               | 2)                    | 3)                  | 4)                  | 5)                | 6)               |
|------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| $a, b, h$        | $a, b, h$             | $a, b, h$           | $a, b, h$           | $a, b, h$         | $a, b, h$        |
| $A, B, \gamma$   | $B, A, \gamma$        | $B, \gamma, A$      | $\gamma, B, A$      | $\gamma, A, B$    | $A, \gamma, B$   |
| $i_1 = i_{ab}^h$ | $i_2 = i_{ba}^h$      | $i_3 = i_{ha}^b$    | $i_4 = i_{hb}^a$    | $i_5 = i_{bh}^a$  | $i_6 = i_{ah}^b$ |
| $-1,6 \dots -7$  | $-0,025 \dots -0,143$ | $0,125 \dots 0,385$ | $0,615 \dots 0,877$ | $1,14 \dots 1,63$ | $2,6 \dots 8$    |

Методику построения кинематических схем редукторов рассмотрим на примере *схемы 1* (рис. 7). Очевидно, что в системе координат  $i^y O i_d$  уравнение (7) является уравнением прямой линии. Для значений  $i_{dB}^y = i_e$  на рис. 8 построено несколько таких прямых, соответствующих левому и правому концу вышеприведенных интервалов. На чертеж нанесены также прямые  $i_{Ad}^y = \text{const}$ , соответствующие тем же концам интервала, и вертикальные прямые  $|i^y| = 8$ . Области, ограниченные данными прямыми, определяют полное множество кинематических схем редукторов, формируемых на основе *схемы 1*, у которых передаточные отношения трехзвенных механизмов лежат в дозволённых интервалах.

Как видно, *схема 1* дает восемь кинематических схем планетарных редукторов. Четыре схемы (*схемы 1 – 11, 1 – 16, 1 – 61 и 1 – 66*) позволяют обеспечивать в одном корпусе весь спектр передаточных отношений, характерных для двухступенчатых редукторов.



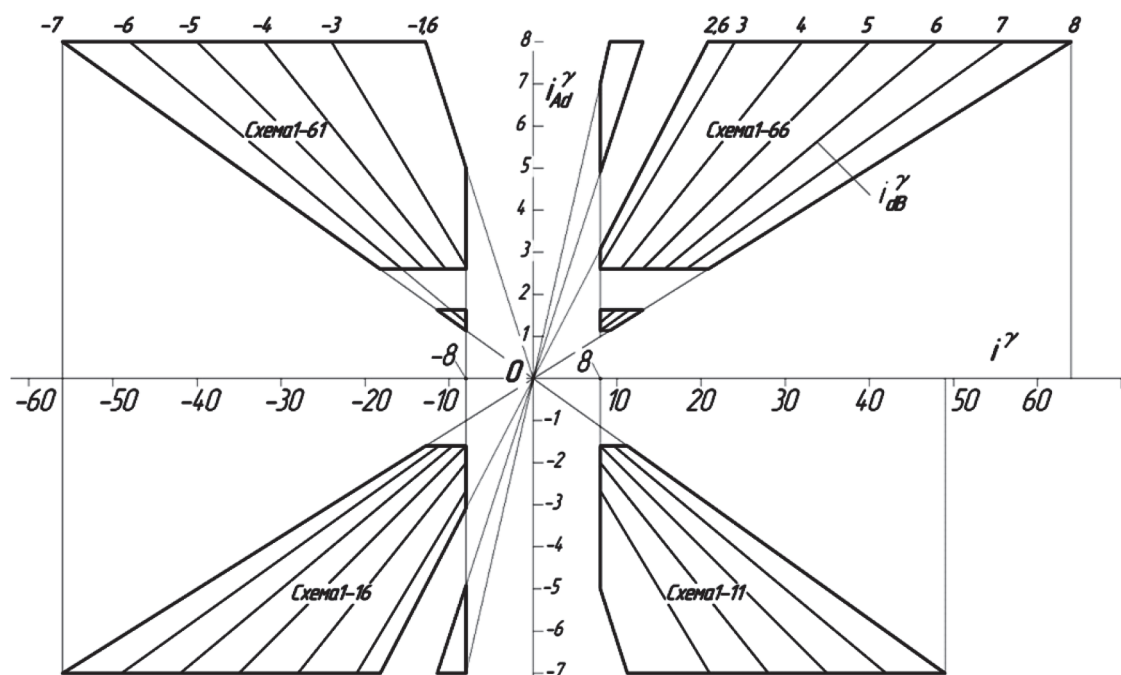


Рис. 7. Области допустимых решений редуктора по схеме 1

В условном обозначении механизма редуктора после номера схемы первая цифра указывает номер интервала передаточного отношения быстроходной ступени  $i_{Ad}^{\gamma}$ , вторая — номер интервала величины тихоходной ступени  $i_{dB}^{\gamma}$ . Так, для схемы 1-61 можно записать:  $i_{Ad}^{\gamma} = i_6 = i_{ah}^b$ ,  $i_{dB}^{\gamma} = i_1 = i_{ab}^h$ , т. е. звенья  $A, d, \gamma$  механизма 1 соединены, соответственно, с солнечным колесом, водилом и эпициклом, а звенья  $d, B, \gamma$  механизма 2 — соответственно с солнечным колесом, эпициклом и водилом (рис. 8, а, б).

Схема 1. Построим в качестве примера данную схему, для чего разместим механизмы двумя возможными способами (рис. 8, а, б). Попытаемся соединить одноименные звенья (см. штриховые линии) так, чтобы рабочие звенья  $A$  и  $\gamma$  могли располагаться снаружи исполнительного устройства (ИУ), а выходное звено  $B$  имело к нему доступ (см. рис. 8).

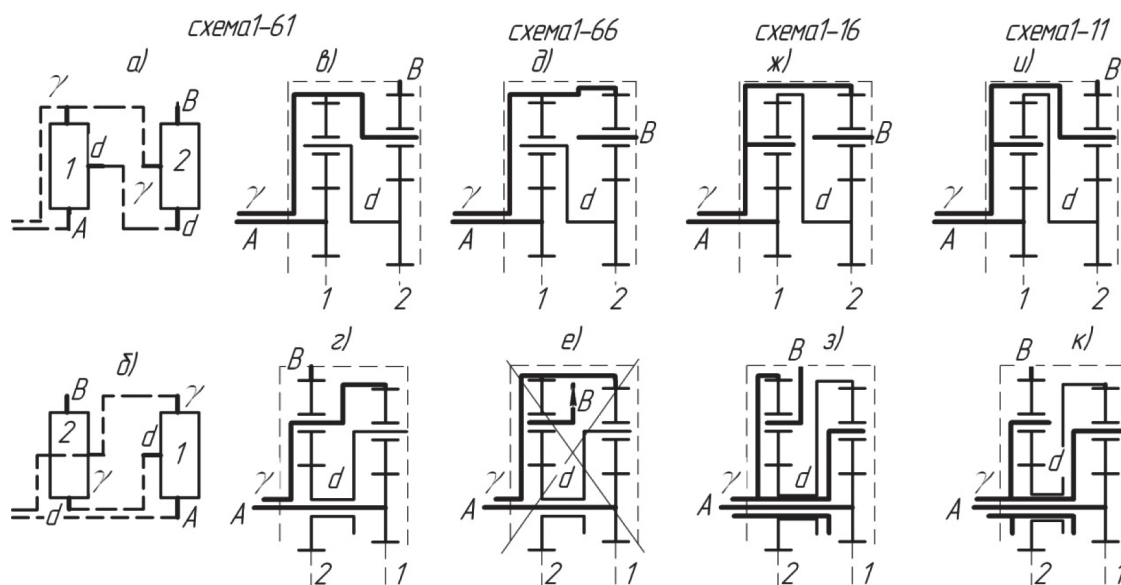


Рис. 8. Построение кинематических схем встроенного редуктора по схеме 1:

а, б — эскизные схемы редуктора по схемам 1-61;

в-к — кинематические схемы при различных способах размещения механизмов



Исполнительное устройство на данном рисунке обозначено штриховой линией. Следует заметить, что недоступность выходного звена снаружи отнюдь не является препятствием при конструктивной разработке редуктора. Как видно, построение встроенного редуктора по схеме 1 – 61 оказывается возможным для обоих способов расположения механизмов. Отметим, что схема на рис. 8, *г* соответствует конструкции редуктора на рис. 3, *а*, запатентованной во Франции для установки в мотор-колесо. В случае расположения быстроходной ступени со стороны, противоположной входу (см. рис. 8, *е*) схема 1 – 66 не может быть построена, так как выходное звено *В* не имеет выхода к ИУ. Схемы 1 – 16 и 1 – 11 при аналогичном расположении быстроходной ступени (см. рис. 8, *з*, *к*) отличаются определенной сложностью (наслоение трубчатых валов). Следует отметить, что в схеме 1 – 11 в обеих ступенях водила неподвижны, и на этом основании схема, оставаясь многопоточной передачей, не является планетарным механизмом.

Схема 2. Кинематические схемы двухступенчатых редукторов по данной схеме строятся аналогично предыдущему: схемы, в которых быстроходная ступень 1 расположена со стороны, противоположной входу, представлены на рис. 9. Как из рис. 8, схема 2 представляет собой замкнутую одноконтурную передачу, для которой характерны три схемы потоков мощности в замкнутом контуре [15]. Схемы потоков мощности можно определить, например, через относительную мощность  $\bar{P}_2 = P_2/P_A$ , передаваемую тихоходной ступенью 2, где  $P_A$  — мощность на ведущем звене редуктора. Для решения обратимся к формуле, предложенной М. А. Крейнсом [10]:

$$\bar{P}_2 = \frac{i_{dB}^y}{i^y} \cdot \frac{\partial i^y}{\partial i_{dB}^y}. \quad (10)$$

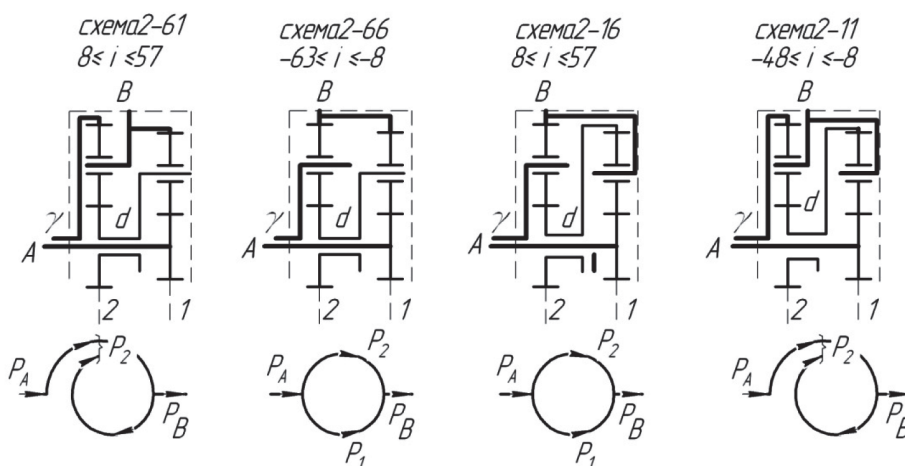


Рис. 9. Кинематические схемы встроенного редуктора по схеме 2 с расположением быстроходной ступени 1 со стороны, противоположной входу, и схемы силовых потоков

При применении данной формулы все передаточные отношения, входящие в формулу для  $i^y$ , кроме  $i_{dB}^y$ , нужно считать постоянными. Перепишав выражение (8) в виде  $i^y = 1 - i_d(1 - i_{dB}^y)$ , найдем

$$\bar{P}_2 = \frac{i_d(1 - i_{dB}^y)}{i^y}. \quad (11)$$

Анализируя применительно к найденным схемам данное равенство, приходим к следующему выводу: для схем 2 – 61 и 2 – 11 характерно наличие циркулирующей мощности в замкнутом контуре, перегружающей тихоходную ступень ( $\bar{P}_2 > 1$ ), что нежелательно с точки зрения прочности, габаритных размеров проектируемого редуктора и снижения КПД; в схемах 2 – 66 и 2 – 16 мощность передается от входного звена к выходному двумя потоками ( $\bar{P}_2 < 1$ ). Схемы 2 – 66 соответствуют схеме редуктора на рис. 4, *б* и являются базовой конструкцией для построения *n*-ступенчатых встроенных редукторов (рис. 10) различными европейскими производителями (см., например, каталоги Brevini, Zollern, Siebenhaar и др.). Передаточное отношение таких конструкций редуктора определяется расширенной формулой вида (8):  $i = 1 - i_d i_e i_f \dots i_k$ . Редуктор,

выполненный по схеме 2 – 16, находит применение в приводах авиационной техники с выводом рабочих звеньев по разные стороны корпуса редуктора (см., например, [16]).

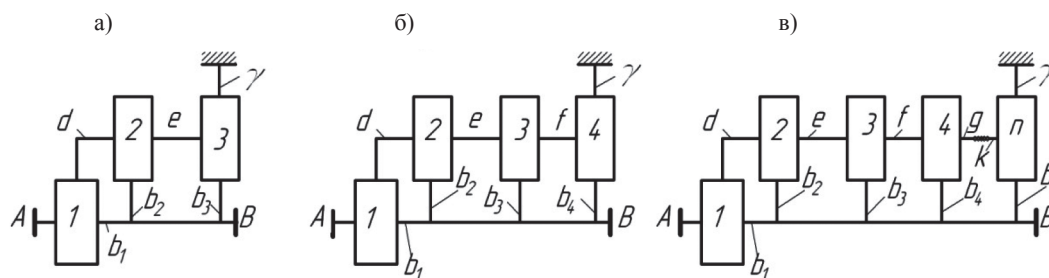


Рис. 10. Схема построения встроенных редукторов фирм европейских производителей:  
а — трехступенчатых; б — четырехступенчатых; в —  $n$ -ступенчатых

Схема 3. Аналогично построению, выполненному для схемы 2, по данной схеме на рис. 11 построены кинематические схемы двухступенчатых редукторов, в которых быстроходная ступень 1 расположена со стороны, противоположной входу, а схемы, отличающиеся большей сложностью, например, схема 3 – 63 и аналогичные им, исключены из рассмотрения. Передаточные механизмы, выполненные по данной схеме, не нашли применения на практике в качестве редукторов, о чем могут свидетельствовать, например, низкие значения КПД подобных механизмов [6]. Ознакомиться с выбором значений конструктивного параметра планетарного ряда, определяющих наименьшие массогабаритные показатели редуктора, можно по данным работы [17].

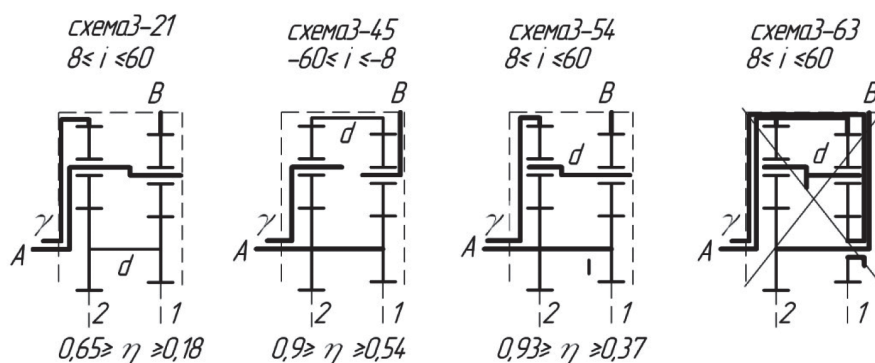


Рис. 11. Кинематические схемы встроенного редуктора по схеме 3 с расположением быстроходной ступени 1 со стороны, противоположной входу

### Выводы (Summary)

1. Поскольку в судовых и крановых приводах отечественных производителей нашли применение планетарные механизмы типа 3k, приводящие к усложнению конструкции и увеличению массогабаритных показателей, в статье рассмотрены приводы, построенные на базе однорядного планетарного механизма с одновенцовыми сателлитами, которые позволяют формировать наиболее простое в конструктивном и более надежное в прочностном отношении устройство, создавая компактные энергоемкие машины. Следует отметить, что исследования, проведенные в статье, применимы также и к механизмам другого типа.

2. С использованием теории двудольных графов определены уравнения, которым должна отвечать формируемая структура. С целью сокращения объема статьи на основе решения полученных уравнений построено все множество структур, пригодных для образования двух- и трехступенчатых редукторов.

3. Предложен способ получения расчетных зависимостей, имеющих простую структуру, для определения передаточного отношения через параметры планетарных рядов редуктора любой сложности.

4. На примере двухступенчатых редукторов показана методика построения схем встроенных редукторов. Для образования структурных схем применен комбинаторный метод в сочетании с методом постановки структуры на различные рабочие звенья.

5. Для выделения на базе данной структурной схемы множества кинематических схем редукторов использован графический метод, в основе которого лежит построение областей допустимых решений на базе полученных расчетных зависимостей.

6. При построении кинематических схем используется метод эскизных схем, при этом для разработки конструкций редукторов, пригодных для встраивания в канатный барабан, учитываются ограничения на расположение рабочих звеньев.

7. Можно надеяться, что разработанная методика поможет российским проектировщикам создавать новые конструкции, не только соответствующие характеристикам изделий европейских производителей, но и опережающие их по своим внешним потребительским свойствам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипарский Г. Р. Судовые краны и лебедки (Атлас конструкций) / Г. Р. Кипарский. — Л.: Судостроение, 1978. — 84 с.
2. Ватипко Б. А. Эксплуатация судовых палубных механизмов / Б. А. Ватипко, Г. П. Нерубенко, С. С. Павлов. — М.: Транспорт, 1991. — 198 с.
3. Кулешов А. А. Пневмоколесные машины с бортовыми приводами и мотор-колесами / А. А. Кулешов, И. И. Марголин. — М.: Машиностроение, 1995. — 312 с.
4. Планетарный зубчатый редуктор. Патент Франции кл. F 16 H 1/28 № 2342434.
5. Филипенков А. Л. Планетарные редукторы, встраиваемые в барабаны грузовых лебедок судовых кранов / А. Л. Филипенков, А. К. Пшизов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. — 2017. — Т. 20. — № 2. — С. 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.
6. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи: справ. / В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Ю. А. Державец, Е. Г. Гинзбург [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
7. Барышников С. О. Обзор методов представления структуры зубчатых механизмов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // Морской вестник. — 2011. — № 2. — С. 108–110.
8. Зыков А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. — М.: Наука, 1987. — 384 с.
9. Сушков Ю. А. Графы зубчатых механизмов / Ю. А. Сушков. — Л.: Машиностроение, 1983. — 216 с.
10. Mollian S. Kinematics of Compound Differential Mechanisms / S. Mollian // Proc. I Mech. E. — 1970. — Vol. 185. — 54/71. — Pp. 733–739.
11. Крейнс М. А. Зубчатые механизмы. Математические основы выбора оптимальных схем / М. А. Крейнс, М. С. Розовский. — М.: Изд-во МГУ, 1965. — 336 с.
12. Волков Д. П. Планетарные, волновые и комбинированные передачи строительных и дорожных машин / Д. П. Волков, А. Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
13. Кристи М. К. Новые механизмы трансмиссий / М. К. Кристи, В. И. Красненьков. — М.: Машиностроение, 1967. — 216 с.
14. Прокофьев В. Н. Основы теории гидромеханических передач / В. Н. Прокофьев. — М.: Машгиз, 1957. — 420 с.
15. Кирдяшев Ю. Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов / Ю. Н. Кирдяшев, А. Н. Иванов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 352 с.
16. Механические передачи вертолетов / под ред. В. Н. Кестельмана. — М.: Машиностроение, 1983. — 119 с.
17. Андрианов Е. Н. Особенности проектирования приводов грузоподъемных машин / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов, С. Н. Федотов // Вестник ИНЖЭКОНА. — 2007. — № 6 (19). — С. 102–112.

### REFERENCES

1. Kiparskii, G.R. *Sudovye krany i lebedki (Atlas konstruktii)*. L.: Sudostroenie, 1978.
2. Vatipko, B.A., G.P. Nerubenko, and S.S. Pavlov. *Ekspluatatsiya sudovykh palubnykh mekhanizmov*. M.: Transport, 1991.

3. Kuleshov, A.A., and I.I. Margolin. *Pnevmokolesnye mashiny s bortovymi privodami i motor-kolesami*. M.: Mashinostroenie, 1995.
4. France. Patent F 16 H 1/28 № 2342434. Planetarnyi zubchatyi reduktor.
5. Filipenkov, A.L., and A.K. Pshizov. "Integrated Planetary Gearboxes for Hoisting Winches in Shipboard Cranes." *Bulletin of Kalashnikov ISTU* 20.2 (2017): 90–93. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-90-93.
6. Kudryavtsev, V.N., Yu.N. Kirdyashev, Yu.A. Derzhavets, E.G. Ginzburg, A.N. Ivanov, et al. *Planetarnye peredachi: spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1977.
7. Baryshnikov, S.O., and A.N. Ivanov. "Obzor metodov predstavleniya struktury zubchatykh mekhanizmov." *Morskoi vestnik* 2 (2011): 108–110.
8. Zykov, A.A. *Osnovy teorii grafov*. M.: Nauka, 1987.
9. Sushkov, Yu.A. *Grafy zubchatykh mekhanizmov*. L.: Mashinostroenie, 1983.
10. Mollian, S. "Kinematics of Compound Differential Mechanisms." *Proc. I Mech. E.* 54/71.185 (1970): 733–739.
11. Kreines, M.A., and M.S. Rozovskii. *Zubchatye mekhanizmy. Matematicheskie osnovy vybora optimal'nykh skhem*. M.: Izd-vo MGU, 1965.
12. Volkov, D.P., and A.F. Krainev. *Planetarnye, volnovye i kombinirovannye peredachi stroitel'nykh i dorozhnykh mashin*. M.: Mashinostroenie, 1968.
13. Kristi, M.K., and V.I. Krasnen'kov. *Novye mekhanizmy transmissii*. M.: Mashinostroenie, 1967.
14. Prokof'ev, V.N. *Osnovy teorii gidromekhanicheskikh peredach*. M.: Mashgiz, 1957.
15. Kirdyashev, Yu.N., and A.N. Ivanov. *Proektirovanie slozhnykh zubchatykh mekhanizmov*. L.: Mashinostroenie, 1973.
16. Kestel'mana, V.N., ed. *Mekhanicheskie peredachi vertoletov*. M.: Mashinostroenie, 1983.
17. Andrianov, E.N., A.N. Ivanov, and S.N. Fedotov. "Osobennosti proektirovaniya privodov gruzopod'emnykh mashin." *Vestnik INZhEKONA* 6(19) (2007): 102–112.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Андрянов Евгений Николаевич** —  
кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

**Иванов Анатолий Николаевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

**Матвеева Елена Владимировна** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrianov, Evgenii N.** —  
PhD, professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

**Ivanov, Anatoly N.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

**Matveeva, Elena V.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [fkt\\_pt@gumrf.ru](mailto:fkt_pt@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2017 г.  
Received: November 18, 2017.

## MODELING OF CARGO OPERATION ABILITY ON PRIRAZLOMNAYA PLATFORM ACCORDING TO THE WEATHER CONDITIONS

**D. A. Zaykin<sup>1</sup>, A. G. Topaj<sup>2</sup>, A. V. Kosorotov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — LLC Gazprom Neft Shelf, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Krylov Shipbuilding Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

*The basic feature of the sea ice platform Prirazlomnaya considered as an element of the transport system is its complex and heterogeneous structure, consisting of cargo handling equipment of various types, locations, operational restrictions and regulations, depending on the environment and the vessels served. Therefore, the traditional method of simulating common “weather windows” for the entire transport node is not applicable in this case. We present the alternative extended approach based on the solution of two interrelated problems: 1) information support with data on environmental parameters and 2) formalization of weather-oriented criteria for the ability of a particular vessel’s operation in a particular berthing facility. To solve the first problem, an original algorithm for dynamic modeling of weather conditions has been developed. It is a stochastic generator of virtual weather «scenarios» in the form of the samples of a multidimensional random process. The qualitative properties and quantitative characteristics of such process are identified according to actual observations. The internal logic of the realized weather generator, allowing simulation a record of 17 characteristics of meteorological, wind-wave and ice conditions with an arbitrary time step, is a synthesis of formal statistical modeling and physically-sound approaches. To solve the second problem, a specific algorithm for estimation the operational availability of each platform cargo terminal by natural conditions has been also developed. Its basic peculiarity is that the availability of each cargo terminal influenced by the values of al environmental parameters (wind speed, wind direction, wave height, ice data etc.) obtained as the output signal of the implemented stochastic weather generator. A final decision about the availability status of each terminal or platform handling equipment is made based on the formalized and verified rules and criteria.*

*Keywords: marine transport system, cargo operations, weather window, data correlation, simulation, stochastic weather generator, availability of cargo terminal.*

**For citation:**

Zaykin, Dmitry A., Aleksandr G. Topaj, and Andrey V. Kosorotov. “Modeling of cargo operation ability on Prirazlomnaya platform according to the weather conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.1 (2018): 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.

**УДК 629.5:004.94**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ПЛАТФОРМЕ «ПРИРАЗЛОМНАЯ» ПО ПОГОДНЫМ УСЛОВИЯМ

**Д. А. Зайкин<sup>1</sup>, А. Г. Топаж<sup>2</sup>, А. В. Косоротов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — ООО «Газпром нефть шельф», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Принципиальной особенностью морской ледовой стационарной платформы «Приразломная» как элемента транспортной системы является его сложная и неоднородная структура, состоящая из средств грузообработки различного вида, характеризующихся своим расположением, ограничениями по доступности и регламентами работы в зависимости от складывающейся окружающей обстановки и типа обслуживаемых судов. Поэтому традиционный метод моделирования единых «окон погоды» для всего транспортного узла в данном случае оказывается неприемлемым. Описанный в статье альтернативный расширенный подход предполагает решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация погодно-ориентированных критериев доступности работы конкретного судна у конкретного причального устройства. Для решения первой задачи был*



создан оригинальный алгоритм динамического моделирования погодных условий. Он представляет собой стохастический генератор виртуальных «сценариев» погоды как реализаций многомерного случайного процесса, качественные свойства и количественные характеристики которого идентифицируются по данным фактических наблюдений. Внутренняя логика реализованного погодного генератора, позволяющего с произвольным временным шагом порождать набор из 17 характеристик метеорологической, ветро-волновой и ледовой обстановки, представляет собой синтез формального статистического моделирования и физически обоснованных подходов. Для решения второй задачи был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала платформы по природным условиям. Особенностью алгоритма является то, что доступность каждого грузового терминала зависит от совместных значений всех природных параметров (скорость ветра, направление ветра, высота волн, толщина льда и т. п.), получаемых как выходной сигнал созданного стохастического погодного генератора. На основании выработанных правил и критериев принимается решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки платформы.

**Ключевые слова:** морская транспортная система, грузовые операции, окно погоды, корреляция данных, имитационное моделирование, стохастический генератор погоды, доступность грузового терминала.

**Для цитирования:**

Зайкин Д. А. Моделирование возможности проведения грузовых операций на платформе «Приразломная» по погодным условиям / Д. А. Зайкин, А. Г. Топаж, А. В. Косоротов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.

### **Введение (Introduction)**

Для поиска наилучших конфигураций морских транспортных систем (МТС), а также с целью определения возможностей существующего флота и инфраструктуры используются различные способы численного анализа и моделирования. Все они обладают разной степенью детализации, однако при этом всегда присутствует расчет основных составляющих рейса, таких как длительность перехода судна и время выполнения различных операций в целевом порту. Традиционная морская транспортная система в большинстве случаев предполагает линейную транспортировку грузов на большие расстояния и, таким образом, основная часть времени рейса уходит на переход. В этих условиях суммарная длительность технологических и грузовых операций в портах оказывает незначительное влияние на эффективность МТС и может быть рассчитана приблизительно. Однако при рассмотрении МТС, работающих на морском шельфе, ситуация меняется. Транспортировка осуществляется на короткие расстояния, а отгрузка в условиях открытого моря требует гораздо больших временных затрат, чем в условиях порта. Таким образом, при моделировании работы МТС на шельфе необходимо детально учитывать все важные особенности проведения грузовых операций на объектах нефтегазовой инфраструктуры (например, на нефтяных платформах).

На сегодняшний день наиболее актуальным инструментом анализа МТС для обеспечения освоения месторождений нефти и газа, который позволяет воспроизвести их работу с высокой степенью точности, является стохастическое динамическое имитационное моделирование. Этот инструмент использован во многих исследовательских работах, тематика которых связана как с флотом обеспечения [1] – [4], так и со смежными задачами морского судоходства [5].

Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» представляет собой нетипичную шельфовую платформу: отгрузка нефти на танкера осуществляется непосредственно с её терминалов, в то время как на стандартных добычных объектах — со специализированных выносных устройств. Данное обстоятельство еще более усложняет работу МТС: длительность отгрузки танкеров и судов обеспечения, вынужденных конкурировать между собой, в большой степени зависит от текущих ледовых и ветро-волновых условий.

Принимая во внимание вышеуказанные обстоятельства, можно заключить, что подробное моделирование доступности терминалов в сочетании со стохастическим исследованием особенностей погодных условий является необходимым при рассмотрении соответствующей транспортно-технологической системы. Так, при тактическом планировании операций или исследовании

эффективности системы снабжения и вывоза нефти с МЛСП «Приразломная» методами имитационного моделирования принципиальным фактором выступает учет так называемых *окон погоды* (точнее говоря, *окон непогоды*) — периодов времени, в которых сочетание характеристик внешней среды приводит к невозможности осуществления погрузочно-разгрузочных операций на грузовых терминалах. Даже предварительный статистический анализ фактически проведенных операций за период функционирования платформы в 2013 – 2016 гг. показывает, что постоянные случаи наступления негативных внешних условий выступают основным фактором, ограничивающим скорость выполнения операций снабжения и/или отгрузки, что приводит к существенному падению интегральной эффективности транспортной системы в целом.

В случае создания имитационной модели большой транспортной системы со многими портами обслуживания основное внимание, как правило, уделяется вопросам создания логистической сети, диспетчеризации движения транспортных средств, маршрутизации и т. д. При этом для описания влияния внешних условий на интенсивность и возможность осуществления грузовых операций в терминальных точках транспортной цепи используется упрощенный подход. Он сводится к описанию доступности порта/терминала в виде единственной переменной логического типа, а смена периодов открытости и закрытости порта моделируется как простейший случайный процесс с двумя возможными состояниями. Однако если как в рассматриваемом случае ставится задача детального исследования транспортно-технологической системы одного конкретного порта или платформы такой упрощенный подход оказывается неприменимым. Это обуславливается несколькими соображениями, которые указываются далее на примере МЛСП.

В центре концептуальной модели транспортной системы в данном случае находится единственный транспортный узел. Однако сам этот узел имеет сложную и неоднородную структуру, состоящую из нескольких погрузочно-отгрузочных терминалов разного типа (комплексы устройств прямой отгрузки нефти (КУПОН), грузовые причалы судов снабжения, вертолетная площадка), снабженных разнообразным грузовым оборудованием. Регламенты работы каждого терминала в зависимости от складывающейся внешней обстановки также различны (например, местоположение КУПОН явно определяет допустимые углы направления ветра для осуществления работ на нем). Более того, они также могут быть прописаны отдельно для каждого типа обслуживаемого или обслуживающего транспортного средства (суда снабжения, танкеры, вертолеты и т. д.). Кроме того, существуют достаточно сложные логические взаимосвязи и ограничения, обуславливающие возможность одновременного использования нескольких терминалов или транспортных средств в зависимости от параметров внешней погодной и ледовой обстановки. Таким образом, никакого единого или общего для всех грузовых терминалов и судов *окна погоды* в данном случае выделено быть не может.

Кроме того, наступление *локального окна непогоды* для обработки конкретного судна у конкретного терминала может быть обусловлено как отдельным, так и совокупным влиянием нескольких метеорологических факторов. На практике прекращение грузовых операций бывает связано с сильным морским волнением, наличием ветров большой силы и таких направлений, которые не позволяют производить удержание танкеров в необходимом швартовном положении у КУПОН или судов снабжения у причальных площадок даже с использованием системы динамического позиционирования, сносом судов за счет поверхностных течений различной природы, а также условиями недостаточной видимости, низких температур или критическими ледовыми условиями (дрейф ледовых полей). Дополнительно закрытие платформы для вертолетных рейсов также может быть вызвано низкой облачностью. Понимание сравнительной важности и частоты воздействия каждого из указанных факторов, приводящих к необходимости откладывания или прерывания грузовых операций, несет важную информацию о том, какие первоочередные меры технического характера следует предпринять для смягчения их негативного влияния.

Все ранее изложенное доказывает необходимость задействования для целей анализа абсолютно «честного» блока описания внешних условий, т. е. моделирования виртуальных или прогнозирования актуальных значений всех интересующих элементов окружающей среды в явном

виде. Именно с учетом ориентации на эти конкретные значения в каждый момент модельного времени в комплексной имитационной модели или реального времени в модуле оперативного мониторинга и планирования должно приниматься решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки.

Таким образом, задача описания локальных *окон погоды* для операций грузообработки у стационарной морской платформы предполагает решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация критериев доступности работы конкретного судна у конкретного терминала в зависимости от создавшейся или возникшей обстановки. Далее в статье приводится последовательное рассмотрение данных вопросов на примере модели транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» [6].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В случае, когда речь идет об оперативном планировании и управлении движением и грузообработкой судов у МЛСП, источником метеорологической информации в системе принятия решений должны служить результаты фактических наблюдений и краткосрочные прогнозы погодной и ледовой обстановки в точке расположения платформы. Инструментом получения соответствующих данных могут являться различные источники и средства оперативного мониторинга, объединенные с алгоритмами краткосрочного прогноза в рамках специализированной системы управления ледовой обстановкой. В свою очередь, описание погоды в имитационном эксперименте предполагает использование не реальных, а виртуальных наборов значений погодных параметров, но при этом предъявляются повышенные требования к объему и разрешению соответствующих выборок (временной горизонт моделирования может составлять несколько десятков лет). Существуют следующие способы достижения данной цели.

1-й способ. Использование временных рядов фактических наблюдений, т. е. прогон модели по predetermined наборам архивных натурных данных или по искусственным «сценариям», полученным «склеиванием» характерных периодов из разных лет (например, произвольное перемешивание месячных интервалов [1]). При таком подходе остается вопрос о корректности искусственного «сшивания» фрагментов натурной динамики метеопоказателей и степени статистической вариабельности получаемых результатов моделирования. Другим существенным ограничением часто является отсутствие фактических измерений с достаточным уровнем детализации.

2-й способ. Применение физически обоснованных моделей глобальной циркуляции, в которых динамика природы описывается как результат реального физического движения воздушных масс, взаимодействия атмосферы, океана и ледового покрова с учетом всех причинно-следственных взаимосвязей. Однако использование таких моделей требует привлечения огромного количества вычислительных ресурсов [7], что невозможно в прикладных имитационных моделях, где погода является не основным объектом исследования, а лишь одним из влияющих на модель факторов.

3-й способ. Создание формальных статистических моделей природных условий («генераторов погоды»), в которых последовательные значения вектора используемых в модели метеохарактеристик рассматриваются как реализация дискретного случайного процесса, свойства которого идентифицируются по имеющимся фактическим наблюдениям. В этом случае для генерации произвольного числа синтетических «сценариев» используется стандартный метод Монте-Карло, а статистические характеристики описываемых природных показателей удовлетворяют выявленным натурным закономерностям.

Именно последний подход, т. е. создание специфического динамического генератора погодных реализаций (морской погоды) был использован в комплексной имитационной модели МТТС платформы «Приразломная» [8] – [10]. Сводные данные по источникам, используемым для создания и параметрической идентификации стохастического генератора погодных условий в районе МЛСП приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Сводные данные по источникам, используемым для создания стохастического генератора погодных условий в районе МЛСП

| № п/п. | Параметр                  | Источник                      |                                                |                         |                             |                  |                                 |                 |                           |                                           |  | Отчет ААНИИ для Севмор-нефтегаза, 2003 г. |
|--------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------------------|--|-------------------------------------------|
|        |                           | Сайт World-Weather-online.com | Сайт Meteo.ru (м. Болванский ГМО им. Федорова) | Сайт гр5.ru (о. Вандей) | Данные измерений на МСП     | Программа wxTide | Справочник РМРС (ветер и волны) | Сайт YR.no      | Отчет ААНИИ для «Гринпис» | Отчет ААНИИ для Севмор-нефтегаза, 2003 г. |  |                                           |
| 1      | Температура воздуха       | С 01.07.2008 г.               | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | –                               | –               | –                         | Статистика с Варандея                     |  |                                           |
| 2      | Направление ветра         | С 01.07.2008 г.               | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | Статистика                      | С 19.04.2016 г. | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 3      | Скорость ветра            | С 01.07.2008 г.               | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | Статистика                      | С 19.04.2016 г. | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 4      | Порывы ветра              | –                             | 1977 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | –                           | –                | Статистика                      | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 5      | Облачность                | С 01.07.2008 г.               | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | –                           | –                | –                               | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 6      | Высота облаков            | –                             | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | –                           | –                | –                               | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 7      | Видимость                 | С 01.07.2008 г.               | 1966 – 2014 гг.                                | 2008 – 2016 гг.         | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | Статистика                      | -               | –                         |                                           |  |                                           |
| 8      | Высота волны (Hs)         | С 19.04.2016 г.               | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 30.10.2014 гг. | –                | Статистика                      | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 9      | Высота зыби               | С 19.04.2016 г.               | –                                              | –                       | –                           | –                | Статистика                      | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 10     | Направление зыби          | С 19.04.2016 г.               | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 30.10.2014 гг. | –                | –                               | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 11     | Направление течения       | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 30.10.2014 гг. | –                | –                               | С 19.04.2016 г. | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 12     | Скорость течения          | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 30.10.2014 гг. | –                | –                               | С 19.04.2016 г. | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 13     | Время высокой/низкой воды | С 19.04.2016 г.               | –                                              | –                       | –                           | С 16.05.2016     | –                               | –               | –                         |                                           |  |                                           |
| 14     | Направление дрейфа льда   | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | –                               | –               | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 15     | Скорость дрейфа льда      | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | –                               | –               | –                         | Статистика                                |  |                                           |
| 16     | Сплоченность льда         | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | –                               | –               | Статистика                | Статистика                                |  |                                           |
| 17     | Толщина льда              | –                             | –                                              | –                       | 30.04.2013 – 09.06.2015 гг. | –                | –                               | –               | Статистика                | Статистика                                |  |                                           |

Примечание. Словом «Статистика» обозначены источники, содержащие не временные ряды параметров, а различные обработанные статистические материалы.

Вопросом первостепенной важности в статистическом моделировании является обеспечение корреляционных свойств моделируемых случайных процессов. Для решения этой задачи в предлагаемом исследовании использована методология формирующих фильтров первого порядка. Применительно к моделированию погоды этот метод был впервые изложен в [11] для случая многомерного процесса, компоненты которого представляют собой величины различной физической природы (логический, или аффинный вектор). Основное уравнение метода описывает рекуррентный алгоритм последовательного пересчета:

$$x_{k+1} = Ax_k + B\varepsilon_k, \quad (1)$$

где  $x_{k+1}$ ,  $x_k$  — вектор центрированных и нормированных значений отслеживаемых характеристик на двух соседних шагах алгоритма;  $\varepsilon_k$  — вектор, составленный из независимых, нормально распределенных величин с нулевым средним и единичной дисперсией;  $A$  и  $B$  — постоянные матрицы фильтра.

Можно показать [11], что для адекватного отражения корреляционных свойств порождаемого случайного процесса матрицы  $A$  и  $B$  должны вычисляться по формулам:

$$A = M_1 \cdot M_0^{-1}; \quad B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T,$$

где  $M_0$ ,  $M_1$  — матрицы кросс- и автокорреляции соответственно.

Такой подход используется для генерации статистически связанных скалярных величин различной природы: температуры и облачности. При этом матрицы формирующего фильтра вычисляются отдельно для каждого календарного месяца.

Для одномерного случайного процесса, т. е. для генерации временного ряда единственной независимой случайной величины  $x$ , формула (1) вырождается к виду

$$x_{k+1} = \rho \cdot x_k + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon_k, \quad (2)$$

где  $\rho$  — коэффициент автокорреляции.

Подобным способом в описываемом генераторе моделируются характеристики ледового режима в периоды присутствия льда: сплоченность, толщина и характерный размер ледового поля.

Особый интерес представляет собой случай, когда необходимо сгенерировать единственную независимую характеристику (например, скорость ветра), которая характеризуется величиной и направлением (физический, или евклидов вектор). Тогда основное уравнение формирующего фильтра первого порядка можно записать в виде

$$w_{k+1} = \alpha_w \cdot w_k + \sqrt{1 - \alpha_w^2} \cdot \varepsilon_k, \quad (3)$$

где  $w_{k+1}$  и  $w_k$  — приведенные вектора направления/скорости ветра на двух последовательных шагах;  $\varepsilon_k$  — случайный вектор, подчиняющийся двумерному нормальному закону распределения с нулевым средним единичной дисперсией.

Скалярный параметр формирующего фильтра  $\alpha_w$  имеет смысл коэффициента автокорреляции для случайной векторной величины и может быть определен в виде

$$\alpha_w = M \left( \left( \hat{W}_{k+1} - M(\hat{W}) \right) \cdot \left( \hat{W}_k - M(\hat{W}) \right) \right) / M \left( \left( \hat{W}_k - M(\hat{W}) \right)^2 \right), \quad (4)$$

где  $\hat{W}$  — размерный вектор фактической скорости;  $M$  — оператор взятия математического ожидания (в случае эмпирической выборки — усреднение по всем наблюдениям), а оператор умножения обозначает скалярное произведение векторов.

Формирующий фильтр служит для получения центрированных и нормированных значений моделируемых метеохарактеристик. Алгоритм их пересчета в размерные величины определяется соображениями о вероятностном законе распределения соответствующего параметра. Перечень способов расчета результирующих значений различных природных параметров приведен в табл. 2.



Таблица 2

**Методы вычисления размерных значений природных параметров**

| № п/п. | Параметр                                          | Закон                                                          | Способ пересчета                                                                                                                                                                                     |
|--------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Температура в °С                                  | Нормальный                                                     | Умножение на текущую величину стандартного отклонения и добавка средней величины, вычисляемой с учетом годового и суточного хода температур                                                          |
| 2      | Облачность в %                                    | Нормальный                                                     | Умножение на текущую величину среднеквадратичного отклонения и добавка текущей средней величины. Отсечение нефизических значений                                                                     |
| 3      | Сила ветра (направление в град. и скорость в м/с) | Эмпирическое табличное распределение (румб/интервал скоростей) | Нахождение ячейки таблицы эмпирического распределения обращением величины кумулятивной функции распределения для сгенерированной величины и выбор случайного значения внутри элементарного интервала |
| 4      | Сплоченность льда в %                             | Эмпирическое распределение                                     | Нахождение интервала эмпирической гистограммы по вычисленным квантилям распределения [12]                                                                                                            |
| 5      | Толщина льда в м                                  | Гамма-распределение                                            | Метод Йонка [13]                                                                                                                                                                                     |
| 6      | Характерный размер ледового поля                  | Эмпирическое распределение (гистограмма)                       | Нахождение интервала эмпирической гистограммы обращением величины кумулятивной функции распределения для сгенерированной величины и выбор случайного значения внутри интервала                       |

Для моделирования автокоррелированных временных рядов величин, имеющих дискретный характер значений или приводимых к такому виду для удобства использования в модели, используется механизм дискретных марковских цепей с конечным числом состояний и статичными, или зависящими от времени года, матрицами перехода между состояниями. В описываемом генераторе таким способом моделируются градация условий горизонтальной видимости, а также факт наличия льда.

Помимо стандартных метеорологических параметров, важными факторами в моделях морской логистики выступают течение и волнение. Они непосредственно связаны с текущими природными явлениями, поэтому для их моделирования логично применение методов расчета, имеющих хоть и очень простое, но физическое обоснование. Так, вектор поверхностного течения в описываемом генераторе вычисляется как суперпозиция приливной и ветровой составляющих в рамках простейшей линейной регрессионной модели с добавочным стохастическим компонентом:

$$V_{flow} = V_{tide} + \alpha_{flow} \cdot W + \beta_{flow} \cdot \varepsilon_{flow}$$

где  $V_{flow}$  — вектор суммарного течения;  $V_{tide}$  — вектор приливной составляющей течения, абсолютная величина которой вычисляется по основной формуле предвычисления прилива из модели АОТИМ [14];  $W$  — ранее сгенерированный на этом же шаге вектор скорости ветра;  $\varepsilon_{flow}$  — случайный вектор, подчиняющийся нормальному закону распределения с нулевым средним и единичной дисперсией;  $\alpha_{flow}$ ,  $\beta_{flow}$  — постоянные параметры.

Аналогично рассчитывается вектор скорости дрейфа льда как добавка «разворота», обусловленного ветровой составляющей к предопределенной доле поверхностного течения. Морское волнение моделируется только как ветровое, поскольку в большинстве случаев влиянием зыби можно пренебречь. Для этого используется упрощенная методика [15], согласно которой истинная значительная высота волнения  $H_{sig}$  (моделируется только для безледового периода) определяется в виде

$$H_{sig} = \min \{h_{max}, h_{dist}, h_{time}\}, \quad (5)$$

где  $h_{dist}$  — высота волнения, ограниченная дистанцией разгона;  $h_{time}$  — высота волнения, ограниченная временем разгона;  $h_{max}$  — максимально возможная высота волнения (высота полностью сформировавшейся волны).

По величине сгенерированной облачности определяется значение нижней границы облаков, которая может являться ограничивающим фактором для операций вертолетного сопровождения МЛСП. Кроме того, дополнительным лимитирующим фактором здесь также выступает горизонтальная видимость. В реализованном имитационном алгоритме стохастического моделирования эта величина описывается в виде дискретной переменной с состояниями, соответствующими предопределенным граничным значениям, зафиксированным в различных регламентах работы МТТС — от нуля (видимость более 2 км) до трех (видимость менее 100 м). Для моделирования такого процесса совершенно естественно использовать классический подход, основанный на применении дискретных марковских цепей. В рассматриваемом случае эта цепь будет иметь четыре состояния, а параметры матрицы переходов между ними могут быть идентифицированы по данным фактических измерений.

На рис. 1 показана общая процедура генерации всех отслеживаемых метеопараметров в реализованном алгоритме имитационного динамического моделирования внешних условий с учетом причинно-следственных связей между порождаемыми элементами. Таким образом, внутренняя логика алгоритма погодного генератора представляет собой синтез статистического моделирования и физически-обоснованных подходов.

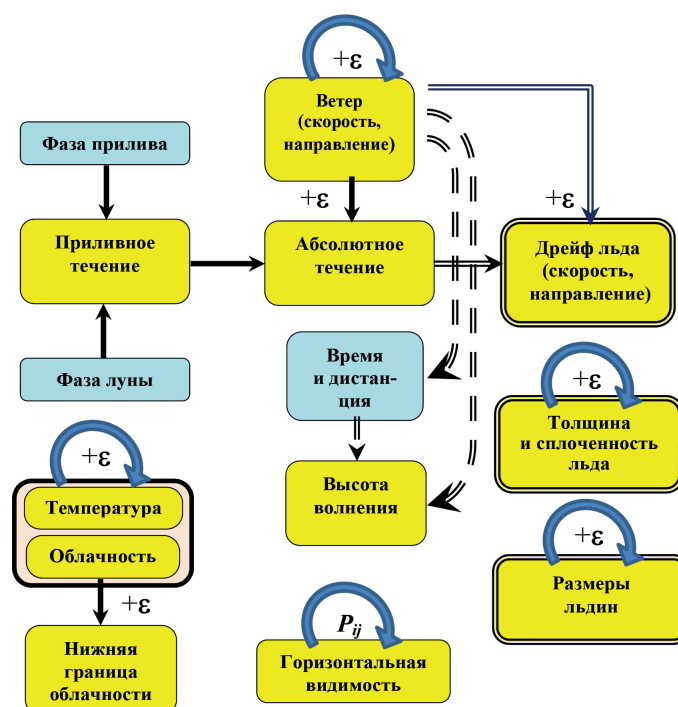


Рис. 1. Последовательность моделирования характеристик в реализованном генераторе характеристик окружающей среды

Для проведения имитационного эксперимента по моделированию жизненного цикла морской транспортно-технологической системы МЛСП «Приразломная» был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала МЛСП по природным условиям. Особенностью данного алгоритма является то, что доступность каждого грузового терминала не определяется пороговым значением только одного природного параметра (скорость ветра, направление ветра, высота волн и т. п.), а зависит от значений всех параметров. При этом моделирование природных условий производится при помощи созданного стохастического погодного генератора, описанного ранее. Генератор выдает значения 17 природных динамических

параметров, номенклатура которых приведена в табл. 1. Очевидно, что число возможных сочетаний этих параметров практически не ограничено, поэтому для создания алгоритма определения доступности терминалов был использован не полный перебор возможных сочетаний параметров, а упрощенный экспертный подход, ориентированный на ключевые параметры и их пороговые совместные значения. Основными источниками данных для создания алгоритма доступности терминалов являются:

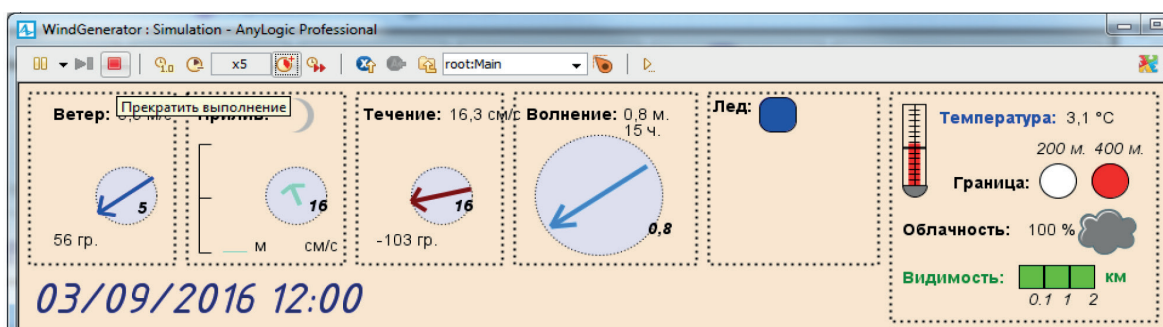
- регламенты выполнения грузовых операций на МЛСП;
- обработанные статистические данные реальных грузовых операций на МЛСП;
- результаты моделирования работы судов при различных погодных и ледовых условиях в навигационном тренажере ФГУП «Крыловский государственный научный центр»;
- экспертные оценки и комментарии капитанов судов, выполняющих грузовые операции на МЛСП.

Описание результатов формализации критериев доступности КУПОН и кранов МЛСП по погодным условиям приведено далее.

### Результаты (Results)

Алгоритм стохастического генератора погодных и ледовых условий окружающей среды в районе МЛСП «Приразломная» и его визуальное представление в виде информационной погодной панели могут быть интегрированы в состав любой имитационной модели (рис. 2) и запускаться, в том числе, в режиме моделирования «в будущем времени», что позволяет эмулировать наличие краткосрочных прогнозов погоды стопроцентной оправдываемости, используемых в оперативном планировании.

а)



б)

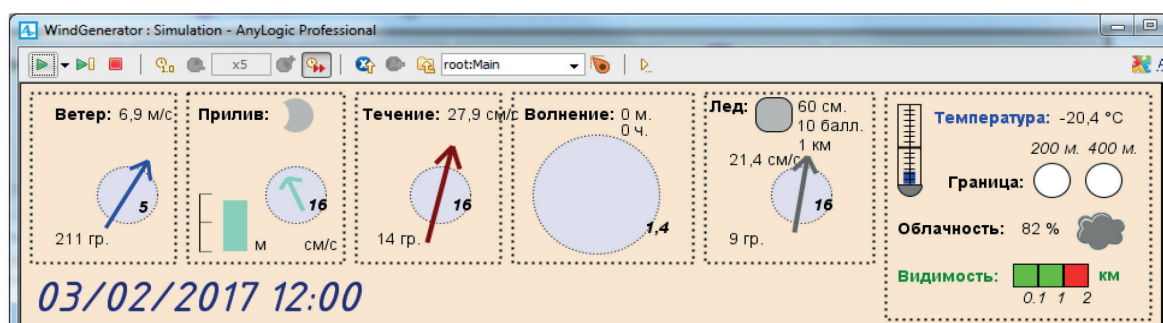


Рис. 2. Внешний вид панели мониторинга условий окружающей среды для условий чистой воды (а) и ледового периода (б)

Генерация значений всех отслеживаемых параметров внешних условий на текущий момент модельного времени (периодичность обновления принята равной 1 ч, однако этот параметр дискретности является одним из настроечных параметров генератора погоды и может быть сконфигурирован произвольным образом, не нарушая работоспособность алгоритма).

Для проверки адекватности спроектированного и реализованного стохастического динамического генератора условий окружающей среды был проведен ряд верификационных тестов, в которых сравнивались разнообразные статистики, вычисленные, с одной стороны, по фактическим реализациям погодных условий, взятых из различных источников, а с другой стороны — по синтетическим «сценариям» виртуальной сгенерированной погоды. Сравнению подвергались как простые статистики (первые моменты распределений, гистограммы и т. д.), так и более сложные показатели (порядковые статистики, вероятности критических выбросов, характерные длины серий квазипостоянства элементов, показатели авто- и кросскорреляции). Большинство тестов демонстрируют высокую степень адекватности реализованного алгоритма, т. е. допустимость и потенциальную полезность его использования в комплексной имитационной модели МЛСП, предназначенной для анализа и оптимизации режимов ее функционирования.

В разработанном с использованием стохастического генератора погодных и ледовых условий окружающей среды алгоритме определения доступности грузовых терминалов МЛСП учтены все четыре моделируемых грузовых терминала: юго-восточный КУПОН, северо-западный КУПОН, восточный и западный грузовые краны.

На рис. 3 и 4 в качестве примера показаны алгоритмы определения доступности юго-восточного КУПОН и восточного крана соответственно. Доступность терминала моделируется по принципу светофора (этот принцип переносится далее и в имитационную модель):

- «зеленый» — разрешены подход, швартовка и грузовые операции;
- «желтый» — разрешены только грузовые операции;
- «красный» — все запрещено.

Алгоритмы определения доступности северо-западного КУПОН и западного крана выполнены аналогично с учетом своих допустимых секторов направлений внешних воздействий ветра, волнения, течения и льда.

Условные обозначения параметров природных условий показаны в табл. 3. Символы на блок-схемах имеют следующие обозначения:

- && — логический оператор «И»;
- || — логический оператор «ИЛИ»;
- ! — логический оператор «НЕ».

Таблица 3

**Принятые обозначения в блок-схемах доступности КУПОН и кранов  
по природным параметрам**

| Описание параметра                          | Условное обозначение |
|---------------------------------------------|----------------------|
| Направление ветра, град.                    | НВ                   |
| Скорость ветра, м/с                         | $V_w$                |
| Направление волнения, град.                 | $H_{\text{волн}}$    |
| Высота волны $h_{3\%}$ , м                  | $h_{3\%}$            |
| Направление течения, град.                  | $H_t$                |
| Скорость течения, м/с                       | $V_c$                |
| Индикатор наличия льда (есть / нет)         | Ice <sub>i</sub>     |
| Приведенная толщина льда, м                 | $h_{\text{ice}}$     |
| Сплоченность льда, баллы                    | Спл <sub>ice</sub>   |
| Направление дрейфа льда, град.              | НД <sub>ice</sub>    |
| Скорость дрейфа льда, м/с                   | $V_i$                |
| Сжатие льда, баллы                          | Сж <sub>Н</sub>      |
| Дальность видимости, м                      | ДВ                   |
| Высота нижнего края облачности, м           | $H_{\text{обл}}$     |
| Температура воздуха, °С                     | t                    |
| Наличие ледового менеджмента (true / false) | Ice_Men              |





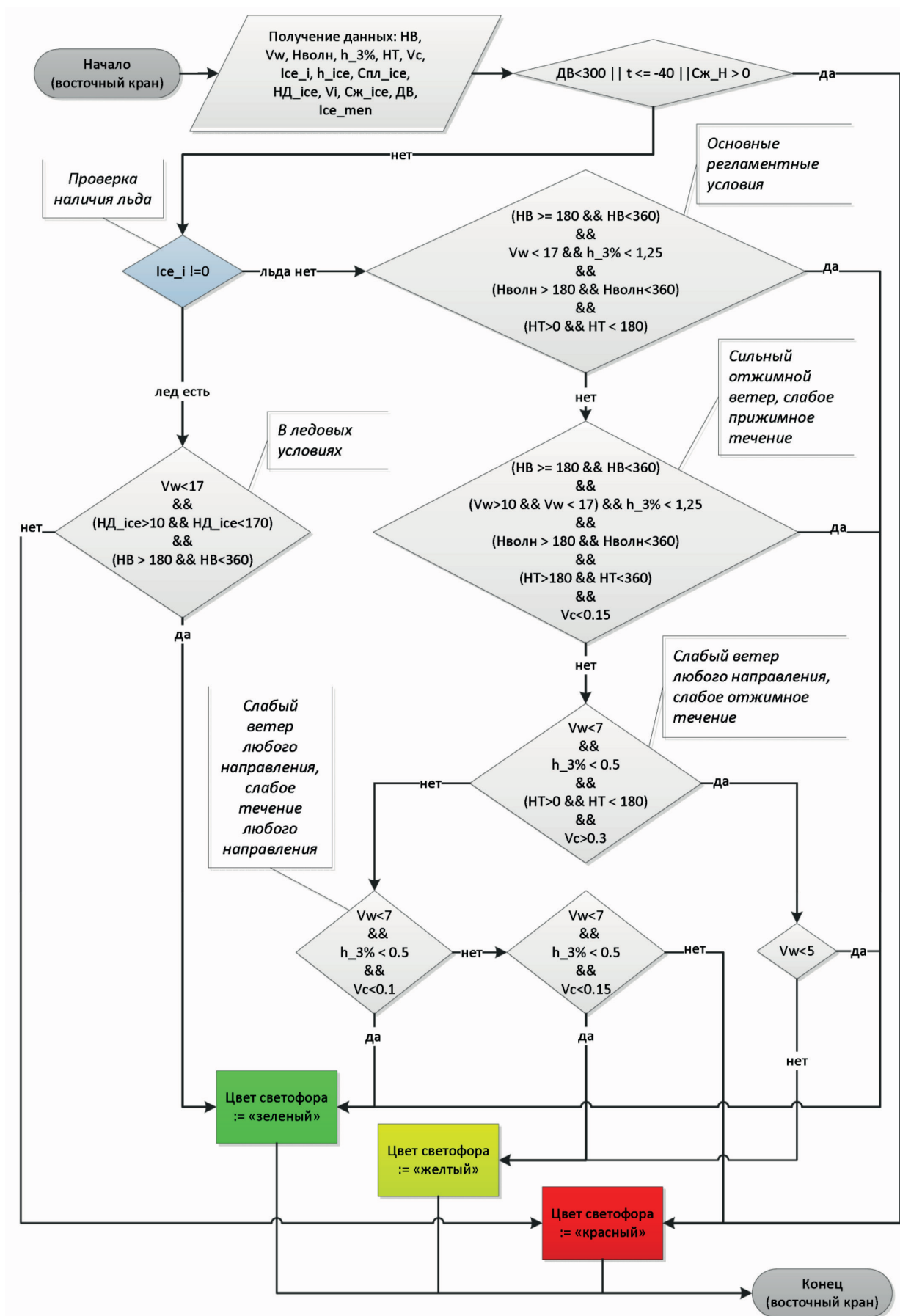


Рис. 4. Алгоритм определения доступности восточного крана по погодным параметрам

Расчетные значения всех принятых ограничений по ветру, волнению, видимости, ледовых условий и другим параметрам приведены непосредственно на схемах рис. 3 и 4. Необходимо отметить, что при разработке алгоритмов определения доступности терминалов принимались проектные характеристики технических средств, обеспечивающих выполнение грузовых операций. Например, как видно из рис. 3, допустимый сектор работы КУПОН принимается равным  $130^\circ$  летом и  $110^\circ$  зимой (без учета ледового менеджмента). При этом необходимо добавить некоторые комментарии о состоянии сектора доступности КУПОН на период 2015 – 2017 гг. Из-за несовершенства используемого швартовного оборудования, фактическое значение сектора доступности КУПОН до лета 2017 г. составляло  $90^\circ (\pm 45^\circ \text{ от оси КУПОН})$ , что было обусловлено конструктивными особенностями швартовной лебёдки. В 2017 г., после модернизации лебёдки, в ходе которой был доработан ролик для укладки на барабан лебёдки швартовного каната, этот сектор был расширен до  $130^\circ$ . Новое значение сектора безопасной работы танкера у КУПОН было согласовано со службами ООО «Газпром нефть шельф», с капитанами судов и МЛСП, после чего оно было включено в документы, регламентирующие безопасность МЛСП.

Созданный алгоритм явился основой для программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП. Внешний вид панели нового программного комплекса представлен на рис. 5. Разработанный программный комплекс был протестирован и апробирован непосредственно на МЛСП «Приразломная» в марте 2017 г. По результатам тестирования программного комплекса были подготовлены предложения по его доработке и практическому использованию в работе компании ООО «Газпром нефть шельф».

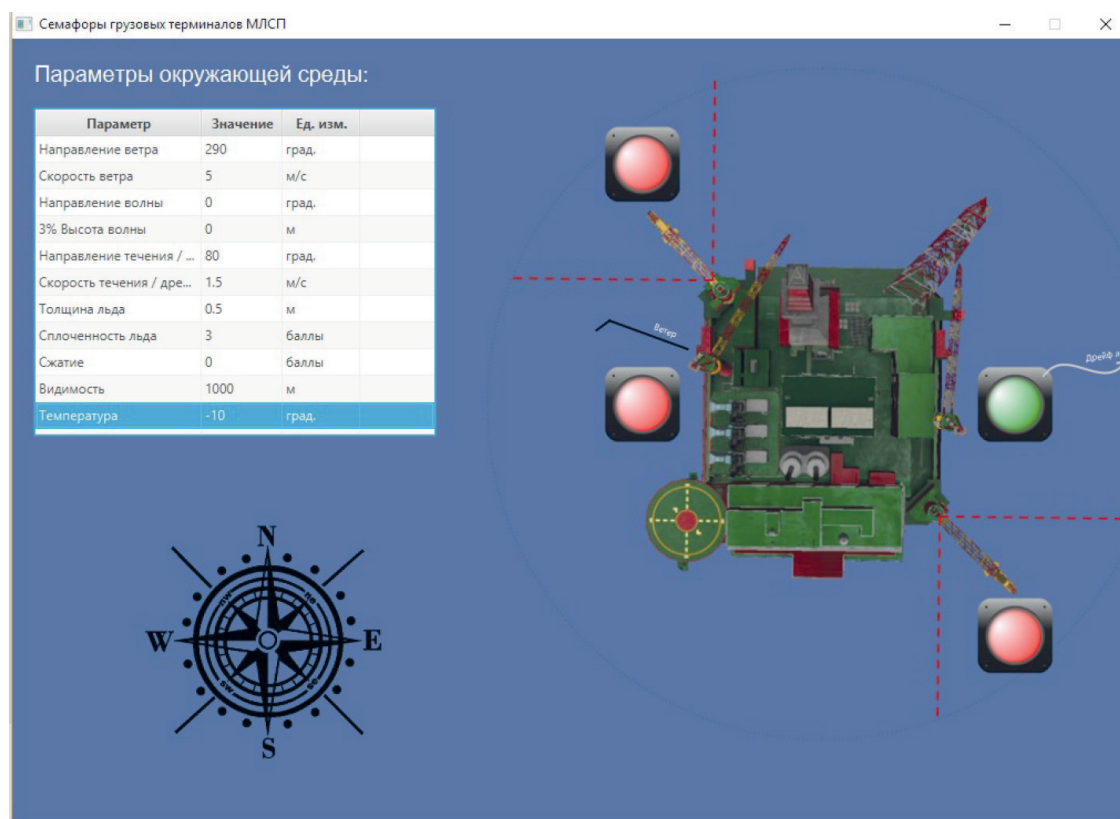


Рис. 5. Внешний вид панели программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП

### Заключение (Conclusion)

Результаты исследования работы транспортной системы обеспечения МЛСП «Приразломная» показали, что эффективность работы системы в значительной степени зависит от скорости выполнения операций снабжения и / или отгрузки нефти. Основным фактором, ограничивающим

скорость выполнения таких операций, выступают постоянные случаи наступления негативных внешних условий.

При этом, когда ставится задача детального исследования транспортно-технологической системы одной конкретной платформы, неприменимым оказывается упрощенный подход, который сводится к описанию доступности порта / терминала в виде единственной переменной логического типа, а смена периодов открытости и закрытости порта моделируется как простейший случайный процесс с двумя возможными состояниями.

Для решения подобной задачи был создан блок описания внешних условий, позволяющий моделировать виртуальные или прогнозировать актуальные значения всех интересующих элементов окружающей среды в явном виде. Именно ориентируясь на эти конкретные значения в каждый момент модельного времени в комплексной имитационной модели или реального времени в модуле оперативного мониторинга и планирования, должно приниматься решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки платформы.

Таким образом, поставленная задача описания локальных «окон погоды» для операций грузообработки у МЛСП «Приразломная» предполагала, как отмечалось ранее, решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация критериев доступности работы конкретного судна у конкретного терминала в зависимости от складывающейся обстановки.

С целью проведения имитационного эксперимента по моделированию жизненного цикла МЛСП «Приразломная» был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала МЛСП по природным условиям. Особенностью данного алгоритма явилось то, что доступность каждого грузового терминала не определяется пороговым значением только одного природного параметра (скорость ветра, направление ветра, высота волн и т. п.), а зависит от совместных значений всех параметров. При этом моделирование природных условий производится при помощи созданного стохастического погодного генератора, который выдает значения семнадцати природных динамических параметров. Созданный алгоритм послужил основой для программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maisiuk Y.* Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times / Y. Maisiuk, I. Gribkovskaia // *Procedia Computer Science*. — 2014. — Vol. 31. — Pp. 939–948. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.346.
2. *Milaković A. S.* Optimization of OSV Fleet for an Offshore Oil and Gas Field in the Russian Arctic / A. S. Milaković, M. Ulstein, A. Bambulyak, S. Ehlers // *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. — American Society of Mechanical Engineers, 2015. — Pp. V008T07A005–V008T07A005. DOI:10.1115/OMAE2015-41366.
3. *Eskandari H.* A simulation-based multi-objective optimization study of the fleet sizing problem in the offshore industry / H. Eskandari, E. Mahmoodi // *Maritime Economics & Logistics*. — 2016. — Vol. 18. — Is. 4. — Pp. 436–457. DOI:10.1057/mel.2015.21.
4. *Малыханов А. А.* Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ / А. А. Малыханов, В. Е. Черненко // *Имитационное моделирование. Теория и практика. Седьмая все-российская науч.-практ. конф.: тр. конференции в 2 т.* — Т. 2. — М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2015. — С. 210–213.
5. *Vanek O.* Agent-based model of maritime traffic in piracy-affected waters / O. Vanek, M. Jakob, O. Hrstka, M. Pechoucek // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2013. — Vol. 36. — Pp. 157–176. DOI: 10.1016/j.trc.2013.08.009.
6. *Зайкин Д. А.* Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. А. Кондратенко, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 3 (23). — С. 86–102. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.

7. Nikishova A. Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN / A. Nikishova, A. Kalyuzhnaya, A. Boukhanovsky, A. Hoekstra // *Environmental Modelling and Software*. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 344–357. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.030.
8. Кондратенко А. А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / А. А. Кондратенко, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 1 (25). — С. 86–101.
9. Топаж А. Г. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем / А. Г. Топаж, О. В. Таровик, А. В. Косоротов, А. А. Бахарев // Труды третьей международной науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2015». — СПб.: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2015. — С. 143–147.
10. Зайкин Д. А. Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Транспорт Российской Федерации*. — 2017. — № 1 (68). — С. 44–48.
11. Richardson C. W. WGEN: A model for generating daily weather variables / C. W. Richardson, D. A. Wright. — U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984. — 83 p.
12. Рожков В. А. Многомерный статистический анализ полей общей сплоченности морского льда северной полярной области / В. А. Рожков, В. М. Смоляницкий // *Известия Русского географического общества*. — 2007. — Т. 139. — № 3. — С. 22–31.
13. Ермаков С. М. Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. — 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1982. — 296 с.
14. Padman L. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean / L. Padman, S. Erofeeva // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — Vol. 31. — Is. 2. — DOI: 10.1029/2003GL019003.
15. Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100. — U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Washington, D.C. (6 volumes).

## REFERENCES

1. Maisiuk, Yauhen, and Irina Gribkovskaia. “Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times.” *Procedia Computer Science* 31 (2014): 939–948. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.346.
2. Milaković, Aleksandar-Saša, Mads Ulstein, Alexei Bambulyak and Sören Ehlers. “Optimization of OSV Fleet for an Offshore Oil and Gas Field in the Russian Arctic.” *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
3. Eskandari, Hamidreza, and Ehsan Mahmoodi. “A simulation-based multi-objective optimization study of the fleet sizing problem in the offshore industry.” *Maritime Economics & Logistics* 18.4 (2016): 436–457. DOI:10.1057/mel.2015.21.
4. Malykhanov, A.A., and V.E. Chernenko. “Imitatsionnoe modelirovanie logistiki snabzheniya arkticheskikh burovykh platform.” *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika Sed'maya vse-rossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, trudy konferentsii v 2 tomakh*. Vol. 2. M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2015: 210–213.
5. Vaněk, Ondřej, M. Jakob, O. Hrstka, and M. Pechoucek. “Agent-based model of maritime traffic in piracy-affected waters.” *Transportation research part C: emerging technologies* 36 (2013): 157–176. DOI: 10.1016/j.trc.2013.08.009.
6. Zaykin, Dmitry Arcadieievich, Aleksandr Alekseevich Kondratenko, Andrey Borisovich Krestyantsev, Oleg Vladimirovich Tarovik, and Aleksandr Grigor'evich Topaj. “Comprehensive Simulation Model of Marine Transport and Support System for “Prirazlomnaya” Platform.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(23) (2017): 86–102. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.
7. Nikishova, Anna, A. Kalyuzhnaya, A. Boukhanovsky, and A. Hoekstra. “Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN.” *Environmental Modelling & Software* 95 (2017): 344–357. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.030.
8. Kondratenko, Aleksandr Alekseevich, Andrey Borisovich Krestyantsev, Oleg Vladimirovich Tarovik, and Aleksandr Grigor'evich Topaj. “Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience.” *Arctic: Ecology and Economy* 1(25) (2017): 86–101.



9. Topazh, A.G., O.V. Tarovik, A.V. Kosorotov, and A.A. Bakharev. "Programmnyi kompleks imitatsionnogo modelirovaniya dlya proektirovaniya i analiza morskikh transportnykh system." *Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem» - «IKM MTMTS 2015»*. SPb.: AO «Tsentr tekhnologii sudostroeniya i sudoremonta», 2015: 143–147.

10. Zaykin, D.A., A.B. Krestyantsev, O.V. Tarovik, and A.G. Topazh. "Application of simulation modelling for analysis of maritime transport and technology system of the Prirazlomnaya platform." *Transport of Russian Federation* 1(68) (2017): 44–48.

11. Richardson, Clarence W., and David A. Wright. *WGEN: A model for generating daily weather variables*. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984.

12. Rozhkov, V.A., and V.M. Smolyanitskiy. "Multivariate statistical analysis of the sea ice compaction fields of the Northern Polar region." *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* 139.3 (2007): 22–31.

13. Ermakov, S.M., and G.A. Mikhailov. *Statisticheskoe modelirovanie*. 2nd ed. M.: FIZMATLIT, 1982.

14. Padman, L., and S. Erofeeva. "A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean." *Geophysical Research Letters* 31.2 (2004). DOI: 10.1029/2003GL019003.

15. *Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100*. U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Washington, D.C.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Зайкин Дмитрий Аркадьевич** —  
заместитель начальника Управления —  
начальник отдела эксплуатации флота  
ООО «Газпром нефть шельф»  
197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Зоологический переулок, д. 2–4, лит. Б  
e-mail: [Zaykin.DA@gazprom-neft.ru](mailto:Zaykin.DA@gazprom-neft.ru)  
**Топаж Александр Григорьевич** —  
доктор технических наук, ведущий научный  
сотрудник  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
196158, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московское шоссе, 44  
e-mail: [Alex.Topaj@gmail.com](mailto:Alex.Topaj@gmail.com)  
**Косоротов Андрей Викторович** —  
Ведущий инженер  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»  
196158, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московское шоссе, 44  
e-mail: [A\\_Kosorotov@mail.ru](mailto:A_Kosorotov@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zaykin, Dmitry A.** —  
Deputy head of directorate –  
chief of fleet operation department  
LLC Gazprom Neft Shelf  
2-4/B Zoologicheskii lane, St. Petersburg,  
197198, Russian Federation  
e-mail: [Zaykin.DA@gazprom-neft.ru](mailto:Zaykin.DA@gazprom-neft.ru)  
**Topaj, Aleksandr G.** —  
Dr. of Technical Sciences,  
Leading Researcher  
Krylov Shipbuilding Research Centre  
44 Moskovskoe shosse Str., St. Petersburg,  
196158, Russian Federation  
e-mail: [Alex.Topaj@gmail.com](mailto:Alex.Topaj@gmail.com)  
**Kosorotov, Andrey V.** —  
Leadind Engineer  
Krylov Shipbuilding Research Centre  
44 Moskovskoe shosse Str., St. Petersburg,  
196158, Russian Federation  
e-mail: [A\\_Kosorotov@mail.ru](mailto:A_Kosorotov@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.  
Received: January 15, 2018.



## IMPROVING RESCUE OPERATIONS IN SEA AND RIVER ACCIDENTS BY IMPROVING THE EFFICIENCY OF USE OF RESCUE EQUIPMENT AND ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS

**A. A. Ershov, P. I. Petukhov, P. I. Okunev**

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

*The article discusses the improvement of rescue operations in marine and river accidents by improving the efficiency of the use of rescue equipment and the implementation of modern environmental requirements. The existing requirements of SOLAS 74 and the other fundamental documents to ensure security and safety of life at least require periodic training and education of crews, including conducting shipboard drills and exercises to simulate abandon ship with passengers and crew and their rescue in case of fire, flooding or other situations. Areas of the world's oceans, especially Polar waters, there is and is actively developing the requirement of "zero discharge", which obviously should apply to rescue operations. After all, the biggest environmental disaster for the environment is the flooding of the vessel, together with fuel oil, cargo, equipment and other pollutants for the water environment. In this connection efficiency of rescue operations as well as other actions performed on the vessel shall provide the minimum ecological pollution and possibility of fast clearing of the water area of consequences of accident. In addition, the efficiency of the use of rescue vehicles to rescue passengers and crew in marine and river accidents presents many problems. To solve these problems, the article discusses the option of maneuvering on the principle of «Course towards the list (hole)» has significant advantages in the displacement of cargo and/or receiving a breakout by the ship. It allows the vessel to be leveled quickly, contribute to the reverse displacement of the cargo, and quickly ensure the safety of the vessel in the event of an accident. For the most effective to save the passengers and crew of the damaged vessel, it is further proposed man oeuvres zigzags with different angular speeds in accordance with the above principle of "a Course in the direction of the list (holes)", if ship still has the positive stability of the vessel when it moves with a maximum speed of with the purpose of hanging over from both sides of ship rescue funds from both the sides of a vessel for use when leaving the ship. The advantage of using successive zig-zags on the principle of "a Course in the direction of the roll (holes)" is that any increase in tilt toward the side from which you want to enter overboard rescue equipment, allows you to create additional shear (gravitational moment) which is capable to help enter overboard even rusted, or painted or soured .rescue equipment .*

*The calculations showed that the increase in tilt toward the side from which you want to launch boats up to 5 degrees, allows to increase the shear (gravitational) moment is more than twice that will allow to effectively implement the operation to die and fall davits, and other rescue equipment, located in any condition and with less team.. Further implementation of zigzags to hold the roll of the vessel in the range that allows carrying out the descent of rescue boats from both sides allows you to dump overboard and lower to the water and other rescue equipment before a deliberate landing on a safe coastal shoal. If no suitable shallow is available, the final descent of all life-saving appliances from both sides can be safely completed after the vessel has stopped to be safely left by passengers and crew in an environmentally safe location.*

*The development and application of the maneuver "Course in the direction of the list (hole)", the further implementation of the zig-zag for the disembarkation of lifeboats and the descent of rescue vehicles before the intended landing on a safe shallow or the safe stopping of the vessel during exercises and training in accordance with the Convention's requirements for emergency situations related to the abandonment of the vessel, will reduce the probability of death of ships, their passengers and improve the efficiency of training of crews at sea and river accidents, as well as reduce the environmental risk of sea and river accidents.*

*Keywords: teaching and training of the crew, performance of zigzag alignment of the roll of the vessel to ensure the descent of rescue tools from both sides, improving the efficiency of rescue of people at sea and river accidents, ensuring of ecological safety in sea and river accidents.*

### For citation:

Ershov, Andrey A., Pavel I. Petuhov, and Pavel I. Okunev. "Improving rescue operations in sea and river accidents by improving the efficiency of use of rescue equipment and environmental requirements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 78–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-78-89.

УДК 655.62.052.4

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ АВАРИЯХ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ И ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

**А. А. Ершов, П. И. Петухов, П. И. Окунев**

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

*Существующие требования СОЛАС-74 и других основополагающих документов по обеспечению безопасности и охране человеческой жизни на море устанавливают проведение регулярной подготовки и обучение экипажей, включая проведение судовых учений и тренировок, направленных на отработку действий по оставлению судна пассажирами и экипажами и их спасение в случае пожара, затопления или в иных аварийных ситуациях. Для определённых районов Мирового океана, прежде всего, включая Полярные воды, существует и активно развивается требование «нулевого сброса», которое, очевидно, должно относиться и к спасательным операциям. Ведь самым крупным экологическим бедствием для окружающей среды является затопление судна, вместе с запасами топлива масла, груза, оборудования и других загрязняющих факторов для водной среды. В связи с чем эффективность спасательных операций так же, как и другие мероприятия, выполняемые на судне, должны обеспечивать минимальную экологическую загрязненность и возможность быстрой очистки акватории от последствий аварии.*

*Отработка и применение маневра «Курс в сторону крена (пробоины)», дальнейшего выполнения зигзага для вываливания шлюпбалок и спуска спасательных средств перед намеренной посадкой на безопасную отмель или безопасная остановка судна в ходе учений и тренировок, в соответствии с конвенционными требованиями по аварийным ситуациям, связанным с оставлением судна, позволит снизить вероятность гибели судов, их пассажиров и повысить эффективность подготовки экипажей при морских и речных авариях, а также снизить экологическую опасность морских и речных аварий.*

*Ключевые слова: учения и тренировки экипажа, выполнение зигзага, выравнивание крена судна, обеспечение спуска спасательных средств, повышение эффективности спасения людей, обеспечение экологической безопасности при морских и речных авариях.*

### **Для цитирования:**

*Ершов А. А. Совершенствование спасательных операций при морских и речных авариях путем повышения эффективности использования спасательных средств и выполнения экологических требований / А. А. Ершов, П. И. Петухов, П. И. Окунев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 78–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-78-89.*

### **Введение (Introduction)**

Существующие требования СОЛАС-74 и других основополагающих документов по обеспечению безопасности и охране человеческой жизни на море требуют проведения регулярной подготовки и обучения экипажей, включая проведение судовых учений и тренировок, направленных на отработку действий по оставлению судна пассажирами и экипажами и их спасение в случае пожара, затопления или в иных аварийных ситуациях. Эти конкретные учебные тревоги должны быть отражены в Судовом журнале с указанием дат проведения учений, а также содержать подробное описание учений по оставлению судна, учений с другими спасательными средствами и подробное описание проводимых на борту учебных занятий. Причем, если они были проведены не в полном объеме или в неназначенное время, должна быть сделана запись, поясняющая объем и назначение проведенного учебного сбора пассажиров и экипажа и выполненных мероприятий по отработке оставления судна. Эти обязательные виды подготовки экипажей судов дополняются и усиливаются требованиями морских администраций, а также требованиями других видов законодательства.

Для определённых районов Мирового океана, прежде всего, включая полярные воды, существует и активно действует требование «нулевого сброса» [1] – [4], которое, очевидно, должно относиться и к спасательным операциям, ведь самым крупным экологическим бедствием для окружающей среды является затопление судна вместе с запасами топлива масла, груза, оборудования и других загрязняющих факторов для водной среды. В связи с чем эффективность спасательных операций, так же, как и другие мероприятия, выполняемые на судне, должна обеспечивать минимальную экологическую загрязненность и возможность быстрой очистки акватории от последствий аварии. Кроме того, большую проблему представляет эффективность использования спасательных средств судов для спасения пассажиров и экипажа при морских и речных авариях. Например, на рис. 1 и 2 показаны документальные свидетельства известных катастроф — гибель лайнера «Costa Concordia» и парома «Sewol». Из представленных фотографий видно, что суда уже имеют значительный крен перед опрокидыванием, а операции по спасению пассажиров и экипажа (спуск спасательных шлюпок) еще не проведены.



Рис. 1. Лайнер «Costa Concordia» с креном 22° на правый борт перед опрокидыванием (спуск спасательных шлюпок еще не начат)



Рис. 2. Опрокидывание корейского парома «Sewol»



Как отмечалось в статье [5], при небольших повреждениях судна соблюдение требований безопасности и экологии может быть достигнуто извлечением пробоины из воды, например, перекачкой жидкостей с одного борта на другой для поднятия борта и возвышения борта судна над водой, вследствие чего снижается вероятность попадания забортной воды внутрь корпуса судна и одновременно снижается опасность вытекания загрязняющих жидкостей из его корпуса. Таким образом, решается задача обеспечения безопасности судна и сохранения экологии окружающей среды, как это предусмотрено существующими требованиями. Если гибели судна в результате аварии избежать не удалось, то в этом случае спасательные операции должны быть проведены таким образом, чтобы после аварии могли быть ликвидированы ее последствия в максимально короткие сроки с минимальным ущербом для окружающей среды.

Как правило, при проведении судовых учений по оставлению судна оно останавливается перед началом спуска спасательных средств, после чего начинается учебная спасательная операция, связанная со спуском шлюпок с обоих бортов или иные учения по спасению пассажиров и экипажа путем оставления судна. Если подобная ситуация потребует в случае реальной аварии, то к моменту остановки судна оно может иметь уже значительный крен, что в случае пассажирского судна сделает невозможным спуск спасательных средств с возвышенного борта судна (это лишает половину пассажиров и экипажа шансов на полноценное спасение) [5].

В частности, после посадки на мель и остановки судна на мели в районе о. Санторини парома «Sea Diamond» судно уже имело крен на противоположный борт, что значительно затруднило спуск спасательных средств с повышенного над водой борта судна и эффективное спасение людей (рис. 3). В результате катастрофы судно погибло, нанеся значительный ущерб окружающей среде острова.



Рис. 3. Фотография начала спуска спасательных шлюпок парома «Sea Diamond» после посадки на мель около о. Санторини

Для эффективного спасения всех пассажиров и экипажа с использованием спасательных средств с каждого борта судна к моменту спуска спасательных средств судно должно иметь крен, не превышающий его предельное значение (рис. 4), так как он позволяет осуществить безопасный спуск шлюпок с обоих бортов пассажирского судна.

Ранее авторами [6] предлагалось проведение маневра поворота (циркуляции) в сторону пробоины и / или крена судна при смещении груза и / или повреждении корпуса. Этот маневр, который для удобства использования судоводителями был назван «Курс в сторону крена (пробоины)», если он выполнен своевременно (при наличии достаточной акватории для маневрирования) будет

способствовать уменьшению крена, выравниваю судна, а также облегчит последующие мероприятия по спасению судна, его пассажиров и экипажа при морских и речных авариях.



*Рис. 4. К определению предельного угла крена, при котором возможен безопасный спуск шлюпок с поднятого (возвышенного) над водой борта*

В статье предлагается расширить возможности данного вида маневрирования и осуществить комбинации аналогичных маневров (в частности, последовательных зигзагов, выполняемых по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)»), которые позволят не только выравнивать судно при наличии повреждения корпуса или смещения груза, но и удерживать его в пределах углов крена, дающих возможность проводить безопасный спуск спасательных шлюпок с обоих бортов судна. Минимальный ущерб экологии может быть достигнут при условии, когда конечной целью подобного маневрирования, если позволяет обстановка, должна стать безопасная посадка судна на береговую отмель, как это предусмотрено требованиями Международной Конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года с поправками, и когда будет обеспечен минимальный экологический ущерб и возможность последующего снятия судна с безопасной мели. Кроме того, когда судно будет находиться на безопасной мели и все спасательные средства будут спущены на воду, может быть выполнена безопасная процедура высадки с судна всех пассажиров и членов экипажа.

#### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Как было показано в [6], сущность уменьшения крена при выполнении манёвра по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» заключается в том, что при данном маневре возникает центробежная сила, которая накреняет судно в сторону, противоположную изменению курса, и уменьшает первоначальный крен. В дальнейшем при таком последовательном маневрировании зигзагами можно удерживать углы крена в диапазоне, достаточном для спуска спасательных средств с обоих бортов судна. Удержание углов крена в диапазоне для безопасного спуска спасательных средств с обоих бортов зависит от начальной метацентрической высоты и скорости движения судна [6].

На рис. 5 [6] показано, что если бы после появления крена на левый борт паром «Sewol» совершил маневр циркуляции в левую сторону «Курс в сторону крена (пробоины)», то в результате возникшего момента от действия центробежных и гидродинамических сил судно бы выровнялось в сторону правого борта, что могло привести к обратному смещению груза и уменьшению возможности попадания воды в корпус судна, в результате опасность гибели парома была бы или могла быть снижена.





Рис. 5. Гибель парома «Sewol» в 2014 г. вместе с 309 пассажирами на борту

Анализ дальнейшей ситуации показал, что если бы в дальнейшем паром «Sewol» совершал последовательные зигзаги по принципу «Курс в сторону крена», то судну удалось удерживать углы крена в пределах, достаточных для безопасного спуска спасательных средств с правого и левого борта, а это, в свою очередь, позволило бы получить необходимое время и возможность экипажу эффективно осуществить спуск спасательных шлюпок с обоих бортов судна, осуществить спасательные операции по оставлению судна и избежать большого количества человеческих жертв (рис. 6).

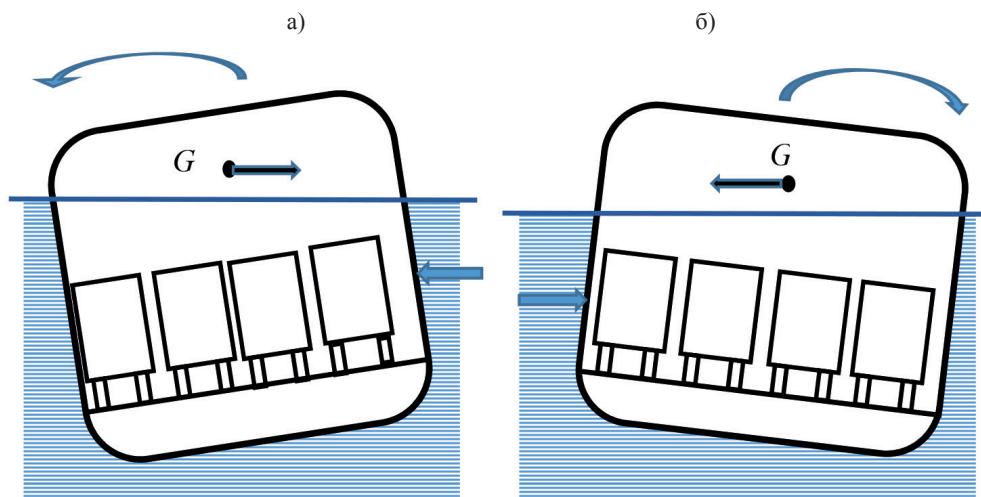


Рис. 6. Последовательный вход (а) и выход (б) парома «Sewol» в зигзаги при выполнении маневров «Курс в сторону крена» и удержание значений углов крена для обеспечения спуска спасательных средств с правого и левого борта

Дополнительным преимуществом использования последовательных зигзагов по принципу «Курс в сторону крена» является то, что любое увеличение крена в сторону борта, с которого необходимо осуществить спуск спасательных шлюпок, позволяет создать дополнительный сдвигающий (гравитационный момент), который способен обеспечить вываливание за борт даже зажавевших, закиших или покрашенных шлюпбалок. Расчеты показывают, что увеличение крена в сторону борта, с которого необходимо осуществить спуск шлюпок до  $5^\circ$ , позволяет увеличить сдвигающий (гравитационный) момент более, чем в два раза, что позволит эффективно осуще-

ствить операцию по вываливанию шлюпбалок, находящихся в любом техническом состоянии и с меньшими силами экипажа.

Например, сдвигающий момент гравитационной шлюпбалки при наличии крена в  $5^\circ$  при выполнении зигзага может быть рассчитан следующим образом:

$$M_c = PR \sin \alpha - PR \sin 15^\circ - PR \sin \theta = 33,55 - 25,39 - 9,48 = -17,64 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

где  $P = mg$  — вес шлюпки (кН);  $R = 5$  м — длина телескопической тяги шлюпбалки;  $\alpha = 5^\circ$  — угол отклонения телескопической тяги (град.);  $15^\circ$  — угол антикрена судна (град.);  $\theta = 5^\circ$  — угол крена судна при выполнении зигзага (град.).

Таким образом, суммарный сдвигающий момент превышает в 2,16 раза сдвигающий момент при отсутствии зигзага судна.

В работе [6] было предложено первоочередное выполнение манёвра «Курс в сторону крена (пробоины)», который способствовал спрямлению судна, выходу пробоины из воды и облегчению проведения последующих спасательных мероприятий и это полностью соответствовало бы соблюдению безопасности и экологических требований. В настоящей статье в дополнение к выполнению маневра по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» предлагается периодическое выполнение зигзагов судна по принципу «Курс в сторону пробоины» для облегчения в этом случае спуска спасательных шлюпок с обоих бортов пассажирского лайнера и обеспечения эффективного спасения всех пассажиров и членов экипажа при аварии, как это произошло при гибели лайнера «Эксплорер» в 2007 г. Как следует из анализа этой аварии, несмотря на гибель судна, маневрирование лайнера «Эксплорер» путем выполнения зигзагов по аналогичному принципу «Курс в сторону пробоины» и удержание необходимого крена в соответствии с выражениями (4), (5) [6] позволило экипажу спустить спасательные шлюпки с обоих бортов судна (рис. 7). Это привело к тому, что ни один человек во время аварии не был потерян, несмотря на то, что сам лайнер «Эксплорер» затонул.



Рис. 7. Маневрирование лайнера «Эксплорер» путем выполнения зигзагов по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)»

В работе [6] показано, что дополнительным преимуществом использования маневра «Курс в сторону пробоины» при получении повреждения корпуса судна и последующих зигзагов для облегчения спуска спасательных шлюпок является возможность быстрого создания необходимого крена для извлечения пробоины из воды за счет снижения остойчивости судна и последующей стабилизации маневрирования при выполнении необходимых зигзагов для облегчения спуска спасательных шлюпок с обоих бортов судна. Далее, по мере частичного затопления судна и при увеличении метацентрической высоты [6], судно становится более устойчивым, что позволяет более

точно регулировать задаваемые углы крена при выполнении зигзагов. В свою очередь, это позволяет надежнее регулировать углы крена при помощи выполнения зигзагов по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» для обеспечения безопасного и эффективного спуска спасательных средств с обоих бортов судна.

Таким образом, дополнительным преимуществом использования последовательных зигзагов, выполняемых по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)», является то, что любое увеличение крена в сторону борта, с которого необходимо осуществить спуск шлюпок, позволяет создать дополнительный сдвигающий (гравитационный момент), который способен обеспечить «вываливание» за борт даже заржавевших, закисших или покрашенных шлюпбалок любого типа меньшими силами экипажа. Это позволило членам экипажа и пассажирам парома «Эксплорер» безопасно спасти всех людей, находящихся на борту, несмотря на гибель самого судна. Аналогичная ситуация возникла в 2012 г. при гибели «Costa Concordia». Однако запоздалое и неудачное маневрирование капитана Ф. Скетино, не позволившее своевременно спустить шлюпки с обоих бортов к моменту посадки на мель, привело к гибели не только самого лайнера, но и нескольких десятков пассажиров и членов экипажа лайнера.

### Результаты (Results)

Наиболее эффективным методом спасения людей при морских и речных авариях с соблюдением экологических требований является комбинация маневров, которая обеспечивает возможность первоначального спрямления судна при помощи маневра «Курс в сторону крена (пробоины)», дальнейшего выполнения зигзагов судна с использованием принципов данного маневрирования для удержания диапазонов углов крена, обеспечивающих безопасный спуск спасательных средств с обоих бортов судна и плавную посадку судна на безопасную береговую отмель. Последующий безопасный окончательный спуск спасательных шлюпок позволит обеспечить спасение пассажиров и экипажа пассажирского судна. Наиболее эффективное средство спасения пассажиров и экипажа, удовлетворяющее всем конвенционным требованиям по безопасности и экологии, позволяет также эффективно устранять последствия аварии.

Варианты эффективного маневрирования лайнера «Costa Concordia» для посадки безопасным способом показаны на рис. 8 – 10. Эти маневры, совместно с выполнением зигзагов, выполняемых по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» позволили бы безопасно спустить спасательные шлюпки с обоих бортов судна и спасти всех пассажиров и членов экипажа лайнера.

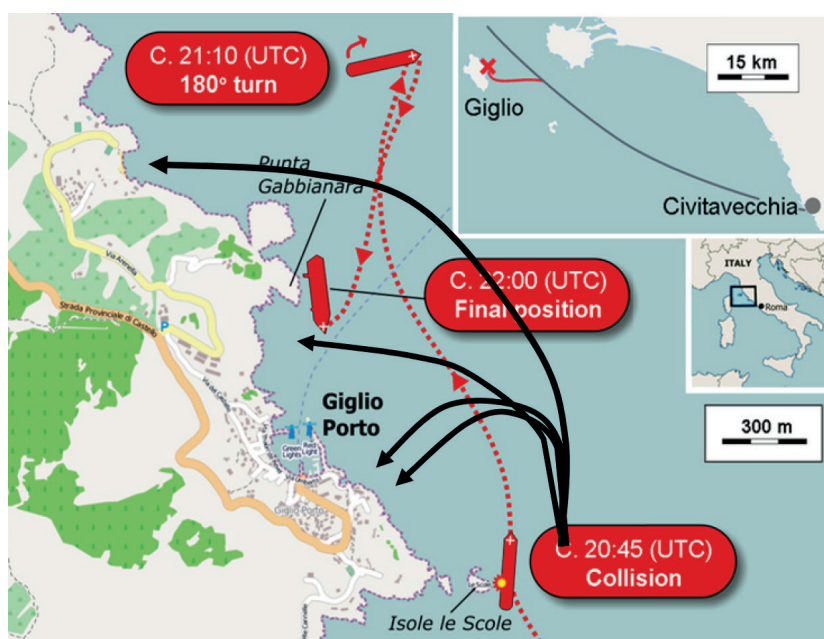


Рис. 8. Варианты эффективного маневрирования лайнера «Costa Concordia» для посадки на мель безопасным способом (показаны черными стрелками)





*Рис. 9. Маневрирование лайнера «Costa Concordia» для посадки на мель безопасным способом с частично «вываленными» шлюпками*



*Рис. 10. Заранее вываленные за борт спасательные шлюпки на лайнере «Costa Concordia»*

Проведённый авторами данной статьи анализ и математическое моделирование комбинаций маневров, выполняемых по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» в начале спасательных операций при смещении груза и / или получении пробоины, последующих зигзагов для удержания углов крена судна в диапазоне, позволяющем спустить спасательные средства с обоих бортов, позволили бы спасти множество человеческих жизней и предотвратить множество экологических катастроф. Предлагаемый в данной статье способ является новым, так как позволяет одновременно решать задачи безопасности и экологии в случае морских и речных катастроф.

### **Обсуждение (Discussion)**

В работах [7] – [11] рассматриваются причины возникновения аварий в различных условиях, а также обосновываются возможности различных видов маневрирования во избежание аварийных ситуаций. Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными других авторов о возможности совершенствования способов спасения судна при различных авариях

путем разработки методов грамотного маневрирования судна после получения повреждения и смещения груза, принимая во внимание не только требования безопасности, но и защиты окружающей среды.

Отработка и применение данного вида маневрирования как этапа спасательных операций в ходе, предусмотренных Конвенциями СОЛАС-74 и ПДНВ 78/95, судовых учений и тренировок позволит повысить эффективность спасения людей при морских и речных авариях и сохранения экологии окружающей среды.

### **Выводы (Summary)**

На основании проведенного в работе эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемое совершенствование спасательных операций при морских и речных авариях путем повышения эффективности использования спасательных средств и выполнения экологических требований является наилучшим способом решения основных проблем при морских и речных авариях.

2. Вариант маневрирования по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» обладает значительными преимуществами при смещении груза и / или получении пробоины судном, так как он позволяет быстро выровнять судно, вывести пробоину из воды, может способствовать обратному смещению груза, вызвавшему накренение судна, и быстро обеспечить безопасность судна при аварии.

3. Для наиболее эффективного для спасения пассажиров и экипажа аварийного судна предлагается выполнение маневров зигзагов с различной угловой скоростью, в соответствии с вышеуказанным принципом «Курс в сторону крена (пробоины)», пока сохраняется положительная остойчивость судна при его движении с максимальной скоростью с целью вываливания за борт судовых спасательных средств с обоих бортов судна для их последующего использования при оставлении судна.

4. Дополнительным преимуществом использования последовательных зигзагов по принципу «Курс в сторону крена (пробоины)» является то, что любое увеличение крена в сторону борта, с которого необходимо осуществить спуск спасательных средств, вываливание шлюпбалок, спуск спасательных шлюпок и т. п., позволяет создать дополнительный сдвигающий (гравитационный момент), который способен обеспечить вываливание за борт даже заржавевших, закисших или закрашенных шлюпбалок. Расчеты показывают, что увеличение крена в сторону борта, с которого необходимо осуществить спуск шлюпок, до 5°, позволяет увеличить сдвигающий (гравитационный) момент более чем в два раза, что позволит эффективно осуществить операцию по вываливанию шлюпбалок, спасательных шлюпок и иных спасательных средств, находящихся в любом техническом состоянии, и меньшими силами экипажа.

5. Дальнейшее выполнение зигзагов для удержания крена судна в диапазоне, позволяющем осуществить спуск спасательных средств с обоих бортов позволяет вывалить за борт и припустить до воды все спасательные шлюпки и иные спасательные средства перед намеренной посадкой на безопасную береговую отмель. Если подходящая мель отсутствует, то окончательный спуск всех спасательных средств с обоих бортов может быть безопасно завершён после остановки судна для безопасного оставления его пассажирами и экипажем в экологически безопасном месте.

6. Отработка и применение маневра «Курс в сторону крена (пробоины)», дальнейшее выполнение зигзага для вываливания шлюпбалок и спуска спасательных средств перед намеренной посадкой на безопасную отмель или безопасной остановкой судна в ходе учений и тренировок в соответствии с конвенционными требованиями по аварийным ситуациям, связанным с оставлением судна, позволит снизить вероятность гибели судов, их пассажиров и повысить эффективность подготовки экипажей в случае морских и речных аварий, а также снизить их экологическую опасность.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulation. — Canada: the Minister of Justice, 2001. — 353 p.
2. Arctic Waters Pollution Prevention Act (AWPPA). — Canada: the Minister of Justice, 1985. — 21 p.
3. Мюррей Р. Цель — Zero Waste / Р. Мюррей; пер. с англ. — ОМННО «Совет Гринпис», 2004. — 232 с.
4. Хмелева Е. Н. Правовая защита морей от нефтяного загрязнения в российском законодательстве: новации и проблемы / Е. Н. Хмелева // Нефть, Газ и Право. — 2014. — № 4. — С. 39–46.
5. Ершов А. А. Рекомендации по спрямлению судна при аварии в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
6. Ершов А. А. Совершенствование подготовки экипажей судов с использованием возможностей маневрирования при авариях / А. А. Ершов, П. И. Петухов, П. И. Окунев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 973–983. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-973-983.
7. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.
8. Zubova A. A. Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). — Singapore, 2014. — Pp. 328–340.
9. Zubova A. A. Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015). — Curran Associates, Inc., 2016. — Pp. 672–684.
10. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
11. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

## REFERENCES

1. Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulation. Canada: the Minister of Justice, 2001.
2. Arctic Waters Pollution Prevention Act (AWPPA). Canada: the Minister of Justice, 1985.
3. Myurrei, R. Tsel' – Zero Waste. OMNNO «Sovet Grinpis», 2004.
4. Khmeleva, E.N. “Legal protection of the seas from oil pollution in the Russian legislation: innovations and challenges.” *Neft', Gaz i Pravo* 4 (2014): 39–46.
5. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Pavel Igorevich Petuhov. “Recommendations to straighten the ship in the accident in ice conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
6. Ershov, Andrey A., Pavel I. Petukhov, and Pavel I. Okunev. “Improving the training of crews of vessels using the possibilities of maneuvering in emergency situations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.5 (2017): 973–983. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-973-983.
7. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. “Breaking the Ice: Navigation in the Arctic.” *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.
8. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. “Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods.” *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014)*. Singapore, 2014: 328–340.
9. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. “Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods.” *Proceedings of International*

*Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015)*. Curran Associates, Inc., 2016: 672–684.

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

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

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ершов Андрей Александрович** —

доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [ershov\\_63@mail.ru](mailto:ershov_63@mail.ru), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

**Петухов Павел Игоревич** — аспирант

*Научный руководитель:*

Ершов Андрей Александрович  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [sevarus89@gmail.com](mailto:sevarus89@gmail.com), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

**Окунев Павел Иванович** — аспирант

*Научный руководитель:*

Развозов Сергей Юрьевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [sevarus89@gmail.com](mailto:sevarus89@gmail.com), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ershov, Andrey 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: [ershov\\_63@mail.ru](mailto:ershov_63@mail.ru), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

**Petuhov, Pavel I.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Ershov, Andrey A.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [sevarus89@gmail.com](mailto:sevarus89@gmail.com), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

**Okunev, Pavel I.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Razvozov, Sergey U.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [sevarus89@gmail.com](mailto:sevarus89@gmail.com), [kaf\\_mus@gumrf.ru](mailto:kaf_mus@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.*

*Received: January 15, 2018.*

## METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGY OF MANAGEMENT OF OVERLOAD PROCESSES OF REFRIGERATIVE CONTAINER CARGOES

**L. A. Pavlova**

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

*The subject of the study is the effective functioning of the port, in particular, the optimal organization and management of transshipment processes. To improve the efficiency of quality indicators, we will consider the use of technology for managing the processing of refrigerated container cargo. To achieve this goal, it is necessary to solve particular problems, one of which is the study and analysis of existing methods for determining the quality indicators of the transshipment processes of cargo lots of a container terminal. The identification and justification of such indicators is carried out by using a probabilistic model built on a queuing system that takes into account random moments of time, such as the arrival of vessels, which entails simple servicing devices or the formation of queues. The substantiation of the field of research is carried out by reviewing the features of sea refrigerated container transportations and concretising the processes of handling cargo consignments. Taking into account the specifics of the operation of container terminals, the proposed system allows optimizing such factors as: simple equipment, excess storage spaces, queues and the possibility of accounting for random variables (the moment of arrival of cargo and the time interval for processing cargo). And leads to more accurate results of calculations. Analyzing the service performance of the terminal, it makes it possible to justify the adequacy of the chosen area of research. By the product of a comparative analysis of the classical and “non-Markovian” approaches, in calculating the probabilistic characteristics of the processing of refrigerated container cargo. The result of this analysis shows that when using the chosen method, the main indicator of the functioning of the system, such as the average waiting time for shipments, is more accurate, and is of less importance than in calculating the classical method.*

*Keywords: mathematical apparatus, probability theory, mathematical statistics, random processes, queuing theory.*

**For citation:**

Pavlova, Lidiya A. “Method of increasing the efficiency of technology of management of overload processes of refrigerative container cargoes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 90–96. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-90-96.

**УДК: 656.615**

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ

**Л. А. Павлова**

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

*Предметом исследования является эффективное функционирование работы порта, в частности оптимальная организация и управление перегрузочными процессами. Для повышения эффективности показателей качества рассмотрим использование технологии управления процессами обработки рефрижераторных контейнерных грузов. Для достижения поставленной цели требуется решение частных задач, одной из которых является исследование и анализ существующих методов определения показателей качества перегрузочных процессов грузовых партий контейнерного терминала. Выявление и обоснование таких показателей осуществляется путем использования вероятностной модели, построенной на основе системы базового обслуживания, которая учитывает случайные моменты времени, такие как прибытие*

судов, что влечёт за собой простой специальных устройств по обслуживанию или образованию очередей. Обоснование области исследования осуществляется путем обзора особенностей морских рефрижераторных контейнерных перевозок и конкретизации процессов обработки грузовых партий. Учитывая данную специфику функционирования контейнерных терминалов, предложенная система оптимизирует такие обстоятельства, как неиспользование оборудования, избыток или недостаток мест для хранения на складах, образование очередей, позволяющие учитывать случайные величины (момент прибытия грузовых партий и интервал времени обработки груза), что приводит к более точным результатам расчетов. Анализ показателей обслуживания работы терминала позволяет обосновать адекватность выбранной области исследования путем выполнения сравнительного обзора классического и «немарковского» подходов при расчетах вероятностных характеристик процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов. Результат данного анализа показывает, что при использовании выбранного метода основной показатель функционирования системы, такой как среднее время ожидания партий груза, имеет меньшее значение, чем при расчетах, выполненных классическим методом.

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки, оптимизация перегрузочных процессов, управление работы порта, показатели качества.

**Для цитирования:**

Павлова Л. А. Метод повышения эффективности технологии управления перегрузочными процессами рефрижераторных контейнерных грузов / Л. А. Павлова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 90–96. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-90-96.

## **Введение (Introduction)**

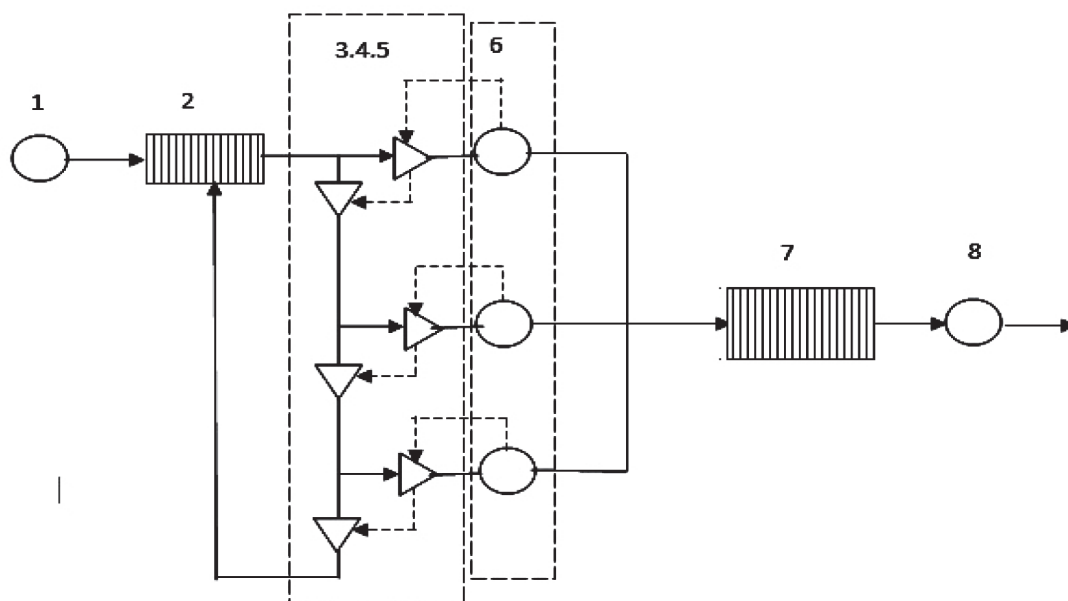
Согласно данным ассоциации морских торговых портов на период январь – октябрь 2017 г., грузооборот увеличился на 9,3 % по сравнению с аналогичным периодом 2016 г. [1]. Портовая деятельность является стратегическим аспектом развития экономики государства и одним из ключевых звеньев функционирования транспортной системы [2]. Наблюдая устойчивый рост развития контейнерных перевозок, возникает вопрос об эффективном функционировании, в частности об оптимальной организации и управлении перегрузочными процессами.

Для выработки современных методов повышения эффективности и технологий управления перегрузочными процессами необходимо провести анализ на основе существующих ранее разработанных методов и технологий в данной предметной области, что впоследствии, учитывая современную специфику процессов управления грузопотоками, позволит выработать методы, отвечающие вызовам времени. Исследуя специфику обработки контейнерных рефрижераторных грузов, приходим к выводу о необходимости учитывать то обстоятельство, что график прибытия судов может нарушаться из-за непредвиденных обстоятельств [3].

Целью практического исследования является повышение эффективности перегрузочных процессов рефрижераторных контейнерных грузов при условии оптимизации показателей качества функционирования. В работах [4] – [6] рассматривается детерминированный метод, который состоит из строго заданных зависимостей, который не отражает случайные моменты доставки партий грузов к терминалу. Подходящим методом для достижения поставленной задачи является вероятностная модель, которая позволяет достигнуть повышения эффективности функционирования перегрузочных процессов в портах, а именно оптимизировать показатель среднего времени обработки грузовых партий.

## **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Обоснование выбранной области исследования осуществляется путем обзора особенностей морских рефрижераторных контейнерных перевозок и конкретизации процессов обработки грузовых партий. В процессе теоретических исследований использовались математические аппараты теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов, входящие в основу теории массового обслуживания. Процесс функционирования обработки грузов в контейнерном рефрижераторном терминале можно представить с помощью системы массового обслуживания (СМО). Представим графически процесс функционирования процессов работы терминала [7], [8] в виде схемы:



Процесс функционирования работы терминала: 1 — поступление судов в терминал; 2 — вход судов в место якорной стоянки в порту; 3 — определение обслуживающей секции для судна; 4 — ожидание освобождения одной из обслуживающей секции; 5 — выход судна из места якорной стоянки; 6 — время обслуживания судов в секции; 7 — освобождение обслуживающей секции; 8 — выход судна из терминала

Условно-функциональные (обслуживающие) секции в порту рассматриваются в качестве обслуживающих устройств, в которых производится обработка грузов. Прибывающие суда, подлежащие обслуживанию, принимаются в качестве заявок СМО. Если все терминалы заняты, то вновь прибывшее судно становится на место якорной стоянки в порту и ждёт своей очереди до освобождения одного из терминала. Каждое судно имеет график прибытия, но из-за непредвиденных обстоятельств этот график, как правило, нарушается. Исходя из ранее изложенного считается, что прибытие судов является случайным событием, что влечёт за собой простой обслуживающих устройств или образование очередей. Возможны ситуации, когда в отдельные периоды времени часть судов может быть передана под обслуживание на другой терминал из-за превышения допустимого времени ожидания.

При применении СМО марковской модели предполагается *экспоненциальный (показательный) закон обслуживания*. Расчет вероятностных характеристик СМО (в случае применения экспоненциального закона) может привести к ошибкам и недостаточной точности.

В большинстве научных изысканиях в области процессов функционирования работы порта для описания пропускной способности контейнерных терминалов используются *детерминированные методы* [9]. При использовании детерминированного метода интервал времени между моментом поступления судов в терминал обслуживания и моментом выхода судна из него не носит случайного характера. Однако момент доставки партий контейнерных грузов к терминалу представляет случайный поток событий. В реальных условиях функционирование работы порта с точки зрения процессов обработки грузов не адекватно указанным допущениям [10] – [12]. Учитывая специфику функционирования контейнерных терминалов, необходимо исследовать случайные процессы обработки судов, описывающие эти процессы на основе вероятностных моделей для решения задач исследования и оптимизации [13] – [14].

Рассмотрим другой подход к расчету характеристик вероятностной модели СМО. Математическая модель процесса хранения строится с учетом нерегулярного прихода партий грузов и случайного времени пребывания их на складе в рефрижераторных терминалах, что приводит в одних случаях к неиспользованию оборудования и избытку мест на складах хранения, а в других —



к образованию очередей. Для того чтобы решить задачи исследования и разработки вероятностной модели, необходимо исследовать случайные процессы обработки судов и произвести их вероятностный анализ. Данные процессы хранения грузов в случайные моменты времени переходят из одного состояния в другое. Переход процесса происходит в моменты, когда новое судно подходит на терминал либо освобождается один из причалов. При этом меняется количество судов, находящееся в очереди на хранение грузов, принимая во внимание гипотезу о том, что поток приходящих в порт партий груза (судов) можно считать простейшим (стационарным пуассоновским), обладающим тремя свойствами: ординарностью, отсутствием последствия и стационарностью, подчиняющейся пуассоновскому закону распределения.

Система характеризуется следующими особенностями:

- поступление судов в систему на обслуживание происходит по одному механизму, т. е. вероятность прибытия двух или более судов в один момент времени очень мала и ею можно пренебречь (поток требований ординарный);
- вероятность прибытия последующих судов в любой момент времени не зависит от вероятности их поступления в предыдущие моменты, т. е. поток требований без последствий;
- поток требований стационарный, т. е. он не зависит от расположения рассматриваемого интервала времени на оси времени [15].

Введем обозначения рефрижераторного контейнерного терминала, имеющего  $F$  условно-функциональных секций с одинаковым коэффициентом заполнения  $\phi$ , на который поступает нерегулярный поток судов (партий грузов)  $m$  с результирующей интенсивностью  $\lambda$ .

Процесс, протекающий при обслуживании контейнерных рефрижераторных грузов в терминалах, представляет собой процесс дискретного типа с конечным или счетным в общем случае множеством состояний. При этом изменяется количество партий груза, находящихся в очереди на обслуживание. В случайный момент времени исследуемые процессы грузовых партий переходят из одного состояния в другое. Переход процесса происходит в моменты, когда прибывает новая партия груза либо освобождается одна из обслуживающих секций. Аналогичный алгоритм и результат получаются также и для процесса обработки контейнерных грузов.

Рассмотрим один из указанных ранее процессов, а именно расчет времени ожидания контейнерных грузовых партий в очереди на хранение. Используя математические вычисления, представим вероятность нахождения  $n$  грузовых партий в терминале через соотношение членов биномиального разложения Ньютона, степенью возведения в этом случае будет число грузовых партий:

$$P_n = C_m^n p^n q^{m-n} = \frac{m!}{n!(m-n)!} p^n q^{m-n}. \quad (1)$$

При выполнении последующих расчетов были введены некоторые допущения: среднюю интенсивность пребывания партии в терминале  $\mu$  будем принимать равной единице, а приведенную интенсивность прихода грузовых партий всего терминала  $\psi$  заменим коэффициентом заполнения  $\phi$  каждой условно-функциональной секции в отдельности. Интенсивность потока грузовых партий определяется соотношением

$$\lambda = \lambda' m, \quad (2)$$

где  $\lambda'$  — интенсивность прихода в терминал каждой грузовой партии.

Определим вероятностные характеристики процессов переработки грузовых партий контейнерного терминала. Среднее число грузовых партий в очереди на хранение определяется выражением:

$$d = \begin{cases} \sum_{n=F+1}^m (n-F) P_n & \text{при } n > F; \\ 0 & \text{при } n \leq F. \end{cases} \quad (3)$$

Среднее число грузовых партий в терминале можно найти по формуле

$$d_{\Sigma} = \sum_{n=1}^m nP_n. \quad (4)$$

Используя полученные результаты, определим среднее время ожидания партии груза в очереди с помощью выражения

$$\bar{\tau}_{\text{ож}} = \frac{d}{\lambda} = \frac{d}{\lambda' m}. \quad (5)$$

Среднее время нахождения партии в терминале определяется выражением

$$\bar{\tau}_{\Sigma} = \frac{d_{\Sigma}}{\lambda} = \frac{d_{\Sigma}}{\lambda' m}. \quad (6)$$

Полученные вероятностные модели позволяют выполнить анализ процессов переработки контейнерных грузов в рефрижераторных терминалах.

### Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Приведем обоснование области исследования путем обзора особенностей морских рефрижераторных контейнерных перевозок и конкретизации процессов обработки грузовых партий. Проанализируем показатель среднего времени ожидания обработки грузовых партий для возможности обоснования адекватности выбранного метода исследования. Рассмотрим классический метод расчета вероятностных характеристик процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов, представленный в работах Ю. Я. Зубарева и И. А. Русинова [3], [5]. Выполним сравнительный анализ классического и немарковского подхода при расчетах вероятностных характеристик процессов переработки рефрижераторных контейнерных грузов. Сравним значения среднего времени ожидания партий груза  $\tau_{\text{ож}}$  в очереди в зависимости от таких параметров, как коэффициент заполнения  $\phi$  и количество условно-функциональных секций  $F$  для различных значений  $m$ , представленных в следующей таблице:

| <i>Среднее время ожидания партий груза при <math>m = 50</math></i>   |                                         |                                         |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                      | Классический подход, $\tau_{\text{ож}}$ | Немарковский подход, $\tau_{\text{ож}}$ |
| $\phi = 0,7$<br>$F = 1$                                              | 1,0                                     | 0,37                                    |
| $\phi = 0,9$<br>$F = 10$                                             | 0,73                                    | 0,14                                    |
| <i>Среднее время ожидания партий груза, при <math>m = 100</math></i> |                                         |                                         |
| $\phi = 0,7$<br>$F = 10$                                             | 0,075                                   | 0,034                                   |
| $\phi = 0,9$<br>$F = 20$                                             | 0,27                                    | 0,08                                    |

Немарковский подход численно лучше ранее используемого классического метода и является логическим продолжением исследований в данной предметной области. Анализируя полученные результаты, следует отметить, что при немарковском подходе среднее время ожидания партий груза точнее и имеет меньшее значение, чем при выполнении расчетов классического метода в несколько раз. Это позволит в дальнейшем, вводя дополнительные системные и частные ограничения, а также проведя эмпирические исследования и апробацию предложенных методов и технологий, сделать вывод об их значительном временном превосходстве.

На практике техническое оборудование порта и инфраструктура как в направлении импорта, так и экспорта может быть не всегда готова к переработке рефрижераторных контейнеров. Теоретическая пропускная способность терминала часто не совпадает с фактической. Поэтому необходима разработка математических моделей, позволяющих минимизировать и оптимизировать затраты на оборудование и ресурсы.

Таким образом, в статье рассмотрены существующие методы определения показателей качества функционирования процессов переработки грузов контейнерного терминала. Анализ выполненных исследований показал, что в целом для описания пропускной способности контейнерного терминала используется детерминированный метод, основанный на классическом (марковском) подходе к построению системы массового обслуживания. Однако использование данного метода не учитывает случайный поток событий, в частности таких, как моменты доставки грузовых партий к терминалу.

### Заключение (Conclusion)

В данной работе получены научные и практические результаты по повышению эффективности проектирования перегрузочных процессов рефрижераторных контейнерных грузов в терминалах за счет выбранного критерия и обоснованных показателей системы, а именно:

- разработана математическая модель расчета технологии управления процессов обработки рефрижераторных контейнерных грузов;
- выполнен сравнительный анализ классического и немарковского методов;
- рассчитано среднее время ожидания партий груза, которое является более точным и имеет меньшее значение при немарковском подходе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грузооборот морских портов России за январь – декабрь 2017 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morport.com/rus/news/document1987.shtml> (дата обращения — 13.01.2018).
2. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года. — М., 2015. — 284 с.
3. *Зубарев Ю. Я.* Оптимизация процессов переработки каботажных грузов / Ю. Я. Зубарев, А. М. Тюкавин. — СПб.: Политехника, 2009. — 168 с.
4. *Тюкавин А. М.* Решение задачи оптимальной загрузки контейнерного терминала на основе анализа интенсивности потока судов / А. М. Тюкавин, И. А. Русинов // Автоматизация, информатизация, инновация транспортных систем: сб. науч.-техн. ст. — СПб.: Парк-Ком, 2007. — Вып. 4. — С. 45–49.
5. *Русинов И. А.* Формализация и оптимизация процессов переработки рефрижераторных грузов на специализированных терминалах / И. А. Русинов. — СПб.: Политехника, 2008. — 472 с.
6. *Зубарев Ю. Я.* Вероятностная формализация процессов обработки каботажных судов на контейнерных терминалах / Ю. Я. Зубарев, А. С. Гайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 1. — С. 70а–73.
7. *Axinte T.* Advanced analysis of the transverse bulkhead of the a general cargo ship / T. Axinte, C. Nutu, C. Stanca, O. Cupsa, A. Carp // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing Ltd, 2016. — Vol. 145. — Pp. 082004. DOI:10.1088/1757-899X/145/8/082004.
8. *Кудрявцев Е. М.* GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 320 с.
9. *Ларин О. Н.* Оптимизация технологических процессов на контейнерных терминалах / О. Н. Ларин, А. М. Саликов // Современное общество, образование и наука: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф.: в 16 ч. — Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. — С. 82–83.
10. *Соколов С. С.* Оптимизация грузопотоков при мультимодальном сообщении / С. С. Соколов, В. Н. Ежгуров // Научные труды SWorld. — 2013. — Т. 8. — № 1. — С. 68–73.
11. *Du R.* Simulation of assembling cargo-hold spaceship pallets / R. Du, P. Wang, Q. Wu, Ch. Jing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing Ltd, 2017. — Vol. 69. — Pp. 012129. DOI: 10.1088/1755-1315/69/1/012129.
12. *Русинов И. А.* Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированных терминалах / И. А. Русинов. — СПб.: Изд-во СПбИИ РАН «Нестор-История», 2005. — 168 с.
13. *Budiyanto M. A.* Study on the CFD simulation of refrigerated container / M. A. Budiyanto, T. Shinoda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing Ltd, 2017. — Vol. 257. — Pp. 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012042.
14. *Максимов В. М.* Вероятностные структуры и вероятностные множества / В. М. Максимов // Успехи математических наук. — 2007. — Т. 62. — № 6. — С. 181–182. DOI: 10.4213/rm7597.

## REFERENCES

1. Gruzooborot morskikh portov Rossii za yanvar' – dekabr' 2017 g. Web. 13 Jan. 2018 <<http://www.morport.com/rus/news/document1987.shtml>>.
2. *Strategiya razvitiya morskoi portovoi infrastruktury Rossii do 2030 goda*. M., 2015.
3. Zubarev, Yu.Ya., and A.M. Tyukavin. *Optimizatsiya protsessov pererabotki kabotazhnykh грузов*. SPb.: Politehnika, 2009.
4. Tyukavin, A.M., and I.A. Rusinov. "Reshenie zadachi optimal'noi zagruzki konteynerного terminala na osnove analiza intensivnosti potoka sudov." *Avtomatizatsiya, informatizatsiya, innovatsiya transportnykh sistem. Sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei*. Is.4. SPb.: Park-Kom, 2007: 45–49.
5. Rusinov, I.A. *Formalizatsiya i optimizatsiya protsessov pererabotki refrizheratornykh грузов na spetsializirovannykh terminalakh*. SPb.: Politehnika, 2008.
6. Zubarev, Yu.Ya., and A.S. Gainullin. "Probabilistic formalization of coasters handling processes on line terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2011): 70a–73.
7. Axinte, T., C. Nutu, C. Stanca, O. Cupsa, and A. Carp. "Advanced analysis of the transverse bulkhead of the a general cargo ship." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 145. IOP Publishing, 2016. DOI:10.1088/1757-899X/145/8/082004.
8. Kudryavtsev, E.M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem*. M.: DMK Press, 2004.
9. Larin, O.N., and A.M. Salikov. "Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov na konteynernykh terminalakh." *Sovremennoe obshchestvo, obrazovanie i nauka: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 16 chastyakh*. Tambov: OOO "Konsaltingovaya kompaniya Yukom", 2015: 82–83.
10. Sokolov, S.S., and V.N. Ezhgurov. "Optimizatsiya gruzopotokov pri mul'timodal'nom soobshchenii." *Nauchnye trudy SWorld* 8.1 (2013): 68–73.
11. Du, Ruizhao, Pengfei Wang, Qianru Wu, and Chenchen Jing. "Simulation of assembling cargo-hold spaceship pallets." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 69. IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/69/1/012129.
12. Rusinov, I.A. *Obrabotka i khranenie refrizheratornykh грузов na spetsializirovannykh terminalakh*. SPb.: Izdatel'stvo SPbII RAN «Nestor-Istoriya», 2005.
13. Budiyanto, Muhammad Arif, and Takeshi Shinoda. "Study on the CFD simulation of refrigerated container." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 257. IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012042.
14. Maksimov, V.M. "Probability structures and probability sets." *Russian Mathematical Surveys* 62.6 (2007): 1215–1217. DOI: 10.1070/RM2007v062n06ABEH004490.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Павлова Лидия Алексеевна** — инженер  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [lidia\\_pavlova13@mail.ru](mailto:lidia_pavlova13@mail.ru),  
[kaf\\_koib@gumrf.ru](mailto:kaf_koib@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Pavlova, Lidiya A.** — Engineer  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation  
e-mail: [lidia\\_pavlova13@mail.ru](mailto:lidia_pavlova13@mail.ru),  
[kaf\\_koib@gumrf.ru](mailto:kaf_koib@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.  
Received: January 15, 2018.

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105

## INFORMATION MODEL OF MARITIME TRANSPORT FLOWS OF THE NORTH SEA ROUTE

**E. O. Olhovik, A. B. Afonin, A. L. Tezikov**

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

*The questions of research and development of the information model of transport streams in the Northern Sea Route (NSR) are considered. The proposed model is designed to control vessels in water area of NSR in order to obtain reliable operational information on maritime traffic flows necessary for carrying out activities aimed at reducing navigation and environmental risks in polar waters. An analytical review of scientific publications devoted to navigation-hydrographic, hydrometeorological and information security of navigation is given. It is noted that for NSR the most developed are issues related to the conditions of a single vessel sailing in difficult climatic conditions, as well as the implementation of certain maritime transport projects in fixed directions (Dudinka port and Obskaya Guba ports). The necessity of developing a model of transport flows of NSR as a whole is substantiated. In the framework of the Agreement on Creative Cooperation of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping and Federal State Institution the Northern Sea Route Administration, signed in November 2017, is developing an integrated geographic information navigation system of NSR, which allows, upon request, to receive objective information on the status and parameters of the traffic flow, background information and information on changing shipping conditions in the water area of NSR ways and in its separate parts relating to the time intervals specified by the range from one day to several years, we count s from 2013. Examples of answers to some queries in graphical or tabular form are given. The ways of improving the technology of updating the database of the information system are outlined. A program has been developed to use the database to study the patterns of sea transport flows in the water area of NSR, as well as to solve a set of practical problems aimed at reducing the risks of polar navigation in the conditions of its development.*

*Keywords: Northern Sea Route, traffic flows, navigation and environmental risks, geoinformation system, information models.*

### For citation:

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.

**УДК 528.47**

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

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

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

*Рассмотрены вопросы разработки информационной модели транспортных потоков Северного морского пути. Модель предназначена для контроля за судами, находящимися в акватории Северного морского пути, для получения достоверной оперативной информации о морских транспортных потоках, необходимой для проведения мероприятий, направленных на снижение навигационных и экологических рисков в полярных водах. Приводится аналитический обзор научных публикаций, посвященных навигационно-гидрографическому, гидрометеорологическому и информационному обеспечению безопасности судоходства. Отмечается, что для Северного морского пути наиболее разработанными являются вопросы, связанные с условиями плавания одиночного судна в сложных природно-климатических условиях,*



а также используемые при реализации отдельных морских транспортных проектов на фиксированных направлениях (порт Дудинка и порты Обской губы). Обосновывается необходимость разработки модели транспортных потоков Северного морского пути в целом. В рамках соглашения о творческом сотрудничестве ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» с Администрацией Северного морского пути, подписанного в ноябре 2017 г., разрабатывается целостная географическая информационная навигационная система Северного морского пути, которая позволяет по запросам получать оперативную объективную информацию о состоянии и параметрах транспортного потока, справочную информацию и информацию об изменении условий судоходства в акватории Северного морского пути и в отдельных его частях, относящихся к интервалам времени, заданных диапазоном от одних суток до нескольких лет, отсчитываемых от 2013 г. Приведены примеры ответов на некоторые запросы в графическом или табличном виде. Намечены пути усовершенствования технологии обновления базы данных информационной системы. Разработана программа использования базы данных для исследования закономерностей морских транспортных потоков в акватории Северного морского пути, а также решения комплекса практических задач, направленных на снижение рисков полярного судоходства в условиях его развития.

**Ключевые слова:** Северный морской путь, транспортные потоки, навигационные и экологические риски, геоинформационная система, информационные модели.

**Для цитирования:**

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.

## Введение (Introduction)

Одним из сдерживающих факторов развития Северного морского пути (СМП) служат навигационные и экологические риски. Экологические риски, как правило, являются следствием навигационных аварий, поэтому они носят определяющий характер. Навигационные риски связаны с вероятностью аварий, обусловленных посадкой судов на мель, касанием грунта, ледовыми повреждениями, штормами и волнением моря, с навалами судов друг на друга и на причальные сооружения.

Статистика аварийности мирового флота [1], [2] показывает, что аварийность увеличивается при возрастании интенсивности судоходства, при росте тоннажа судов, в мелководных районах с недостаточной гидрографической изученностью, при несоответствии конструкции судов ледовым условиям, при нарушении правил маневрирования в сложных гидрометеорологических условиях, при буксировках, движении в караванах и при других обстоятельствах.

Вместе с тем, по данным ЦНИИМФ [3], фактическая навигационная аварийность на трассах СМП по состоянию на 2006 г. в несколько раз меньше аварийности неарктических морей.

На трассах СМП, начиная с 2012 г., изменяются условия и режим судоходства. В первую очередь, отмечается [4] – [6] следующее:

- изменение интенсивности судоходства;
- увеличение тоннажа и осадки судов;
- развитие сети маршрутов, на которых реализуется круглогодичная или продленная навигация;
- ввод в строй транспортных судов, способных совершать самостоятельное плавание в тяжелых льдах;
- плавание судов с предельно малым запасом воды под килем.

Характер изменения условий соответствует тенденции увеличения риска навигационных аварий на СМП. С учетом экологической уязвимости арктических морей особую актуальность приобретает вопрос о пределах риска навигационных аварий и об обосновании мероприятий по повышению навигационной безопасности арктического судоходства и экологической безопасности арктических морей. Решению этой задачи посвящены многочисленные работы, в которых рассматриваются отдельные маршруты и районы СМП, отдельные типы судов и виды морских операций, а также принимаются усилия по разработке моделей морской транспортной системы СМП.

Все разрабатываемые навигационные модели морских транспортных систем условно можно подразделить на модели трех уровней:

- *1-й уровень* — микромодели, в которых учитываются навигационные риски одного конкретного судна;
- *2-й уровень* — мезомодели, в которых навигационные риски относятся к группе судов, работающих на отдельных направлениях, в районах или на объектах;
- *3-й уровень* — макромодели, предназначенные для исследования транспортных потоков в акватории СМП в целом.

Навигационные модели морских транспортных систем предназначены для исследования взаимодействия отдельных судов, их групп и всего флота с окружающей средой и определения пределов их безопасной эксплуатации.

Принципиальная структура моделей предполагает наличие в ней трех формализованных частей:

- модели транспортных средств и параметров их движения;
- модели навигационных опасностей;
- модели взаимодействия транспортных средств с потенциальными источниками навигационных опасностей.

Оценка навигационных рисков в моделях относится либо к транспортным средствам, что особенно характерно для микромоделей, либо к району плавания и навигационному периоду, что более характерно для макромоделей.

В теоретическом плане для СМП наиболее разработанными являются вопросы, связанные со сложными условиями плавания одиночного судна. Исследованию причин аварийности судов, связанных со столкновениями с другими судами, с посадками на мель и касаниями грунта, с тяжелыми ледовыми условиями и другими факторами посвящены работы В. А. Логиновского [7], С. Н. Некрасова [8], В. А. Михальского [9], П. Е. Бураковского [10], К. Е. Сазонова [11]. Географическая привязка навигационных рисков, как правило, не производится, параметры транспортных потоков не учитываются.

Влияние навигационно-гидрографических и гидрометеорологических факторов на безопасность судоходства на отдельных направлениях и районах арктических морей всесторонне исследуется при проектировании и эксплуатации новых путей движения судов. В процессе исследований определяются наиболее опасные в навигационном отношении участки исследуемой акватории и разрабатываются рекомендации по снижению на этих участках риска навигационных аварий. Наиболее значимыми примерами исследований последних лет служат работы по формированию высокоширотных трасс СМП, маршрутов крупнотоннажных морских судов в Карском море (порт Дудинка и порты Обской губы) [11] – [13].

СМП представляет собой сложную транспортную систему, в которой с различной интенсивностью происходят разномасштабные процессы, связанные с изменениями плотности и динамических характеристик морских транспортных потоков. Исследованию этих процессов должно предшествовать формирование информационной системы, объединяющей модели всех уровней.

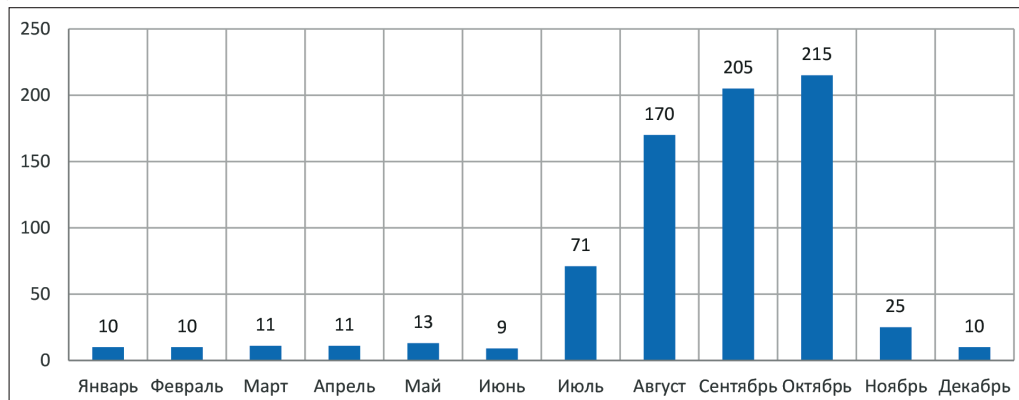
Поиск подходов к формированию такой системы активно ведётся в настоящее время. Примерами служат следующие работы. В цикле работ [14] – [16] обоснован междисциплинарный подход к проектированию и анализу работы морских транспортных систем в Арктике с использованием геоинформационных систем (ГИС). Предложена методика построения стохастических моделей локальных транспортных систем, которые могут быть отнесены, в соответствии с предложенной ранее классификацией, к мезомоделям. В работе [17] предложены пути перехода от частных к общим моделям морских транспортных систем на основе интеллектуальной ГИС. К таким исследованиям также относится работа [18], в которой для планирования судоходных маршрутов Северо-Западного прохода Арктики, используется многослойная 3D ГИС-модель. В публикации [19] разработан метод формализации оценки безопасности акватории СМП, в основе которого ис-



### Результаты (Results)

Результаты запросов позволяют формировать различные статистические данные. В качестве примера на рис. 2 приведены данные о распределении количества судов в акватории СМП по месяцам 2013 г. (рис. 2, а) и 2014 г. (рис. 2, б).

а)



б)

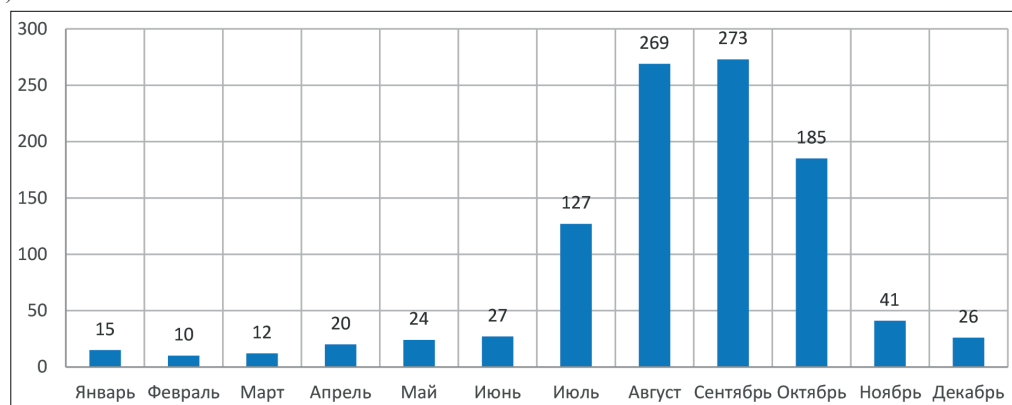


Рис. 2. Распределение количества судов в акватории СМП по месяцам 2013 г. (а); 2014 г. (б)

Графики позволяют наглядно оценить соотношение количества судов, работающих в период летне-осенней навигации (июль – ноябрь), с количеством судов, работающих в зимне-весеннюю навигацию (ноябрь – декабрь, январь – июнь), а также отметить увеличение общего количества судов в 2014 г. по сравнению с 2013 г.

На рис. 3 представлено распределение средней скорости движения всех судов в акватории СМП по месяцам 2014 г. с учётом и без учёта времени, когда судно не имело хода, находилось в порту для разгрузки-погрузки.

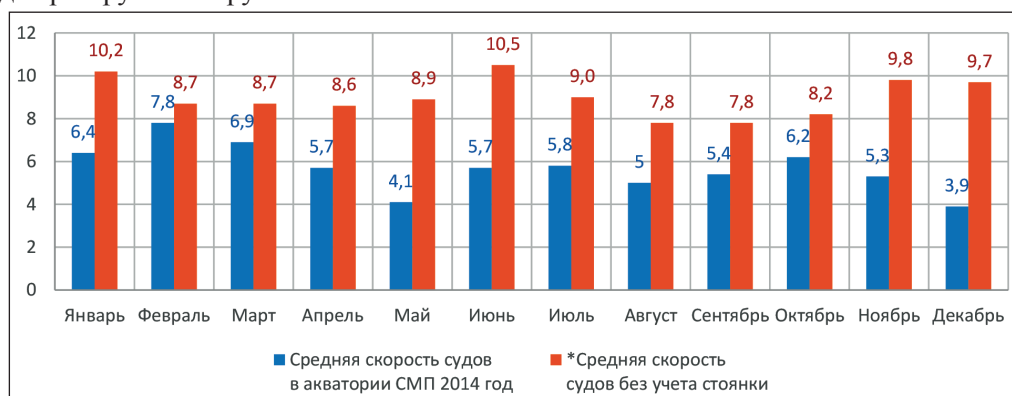


Рис. 3. Распределение средней скорости судов в акватории СМП по месяцам за 2014 г.

На рис. 4 представлено распределение общего количества судов в западной (Карское море) и восточной (море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря) части акватории СМП по месяцам 2014 г.

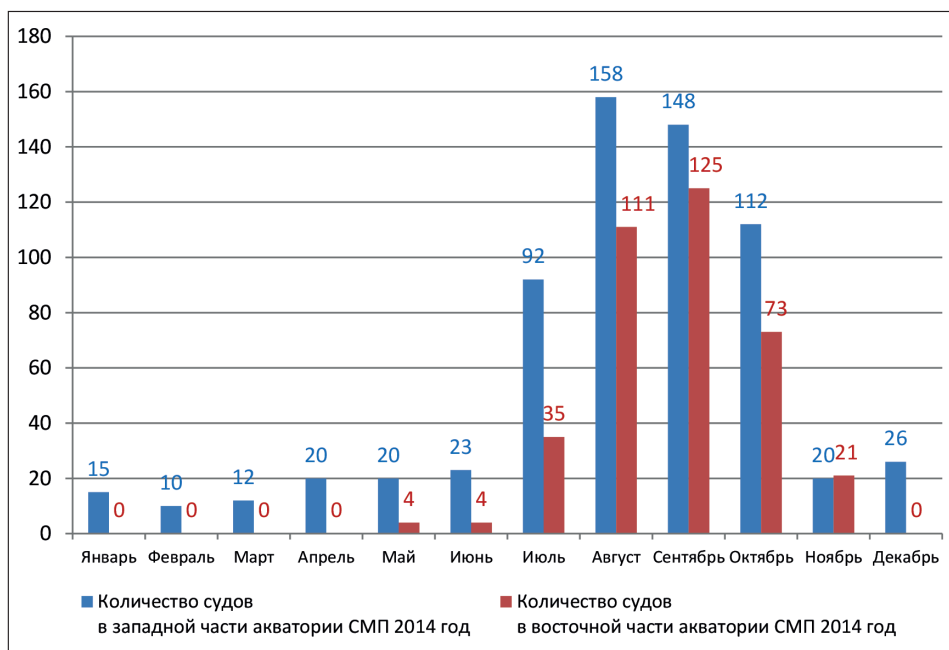


Рис. 4. Распределение судов в западной и восточной части СМП, 2014 г.

В таблице приведены данные о количестве судов, получивших разрешение на работу в акватории СМП с 2013 по 2017 г. Суда разделены на две группы: суда неарктического класса и суда арктического класса. К судам арктического класса отнесены суда с категориями ледового усиления Arc4 и выше.

#### Количество судов, получивших разрешение для работы в акватории СМП

| Год  | Всего судов | Суда неарктического класса | Суда арктического класса |
|------|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 2013 | 635         | 432                        | 203                      |
| 2014 | 631         | 442                        | 189                      |
| 2015 | 715         | 488                        | 227                      |
| 2016 | 718         | 457                        | 261                      |
| 2017 | 662         | 456                        | 206                      |

Приведенные данные показывают, что количество выданных разрешений в 2013, 2014 и 2017 гг. было примерно одинаковым. В 2015 и 2016 гг. количество выданных разрешений увеличилось примерно на 10 %. Количество выданных разрешений напрямую не связано с интенсивностью транспортных потоков на СМП. С 2013 по 2017 г. произошло перераспределение судовых потоков, что повлекло за собой существенный рост плотности и интенсивности судоходства в Карском море и общее снижение показателей в восточной части акватории СМП.

#### Обсуждение (Discussion)

Следует отметить трудоемкость формирования БД ГИС, связанную с анализом большого количества информации о судах, работающих в акватории СМП. В перспективе планируется разработать и внедрить технологию автоматизированного ввода данных, что позволит повысить оперативность формирования и ежесуточного обновления БД ГИС.



Результаты запросов к БД ГИС позволяют анализировать текущее состояние и динамику транспортной системы СМП с учетом того, что информация о положении судов обновляется в БД не чаще чем раз в сутки. Эта информация с учётом наложения дополнительных слоёв, в том числе ледовой и гидрометеорологической обстановки, поля глубин, закрытых для плавания районов и т. д., может быть использована для оценки рисков навигационных аварий на микро-, мезо- и макроуровнях.

ГИС позволяет исследовать плотность и динамику транспортных потоков во всей акватории СМП в разные навигационные периоды, что позволяет в транспортном потоке выделить отдельные группы судов, в том числе по осадке и по назначению.

### Выводы (Summary)

1. Впервые сформулирована и обоснована структура состава элементов ГИС СМП в виде отдельных информационных слоев, предназначенных для исследования транспортных потоков в акватории СМП в целом.

2. Предложена информационная модель морских транспортных потоков СМП как инструмент, позволяющий наглядно и информативно сформировать оперативные данные о движении судов и получить обобщенную информацию в течение заданного временного периода.

3. Результаты работы могут быть использованы при проектировании средств навигационного ограждения в акватории СМП, планировании спасательных операций, оценке рисков навигационных аварий и решении других задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацман Ф. М. Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства / Ф. М. Кацман, А. А. Ершов // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 5 (5). — С. 82–84.
2. Фисенко А. И. Риски организации судоходства в Арктике по Северному морскому пути / А. И. Фисенко // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 260–262.
3. Проблемы Северного морского пути / Совет по изучению производительных сил РАН; Центральный науч.-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота (ЦНИИМФ). — М.: Наука, 2006. — 581 с.
4. Комков Н. И. Направления модернизации арктической транспортной системы / Н. И. Комков, В. С. Селин, В. С. Цукерман // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). — 2014. — № 20. — С. 4–11.
5. Лебедев Г. В. Перспективы развития арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 179–189.
6. Олерский В. А. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. А. Олерский // Транспортная стратегия – XXI век. — 2015. — № 29 (2). — С. 8–9.
7. Логиновский В. А. Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.
8. Некрасов С. Н. Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 98–100.
9. Михальский В. А. Оценка навигационной безопасности плавания вблизи точечных опасностей / В. А. Михальский, М. В. Тюлькин // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 17–26.
10. Бураковский Е. П. К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитровский // Известия КГТУ. — 2013. — № 29. — С. 159–164.
11. 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.
12. Спирин А. Н. Круглогодичная навигация на порт Сабетта / А. М. Спирин, Д. А. Чачин, А. А. Смирнов // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 88–95.

13. Рукша В. В. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша, М. С. Белкин, А. А. Смирнов, В. Г. Арутюнян // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.
14. Кондратенко А. А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / А. А. Кондратенко, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86–101.
15. Топаж А. Г. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем / А. Г. Топаж, О. В. Таровик, А. В. Косоротов, А. А. Бахарев // Сб. тр. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем-ИКМ МТМТС-2015». — СПб., 2015. — С. 143–147.
16. Tsvetkov M. An Intelligent GIS-Based Approach to Vessel-Route Planning in the Arctic Seas / M. Tsvetkov, D. Rubanov // Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17). — Springer, Cham, 2018. — Pp. 71–86. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9\_6.
17. Осипов В. Ю. Моделирование морских транспортных систем на основе интеллектуальных геоинформационных систем / В. Ю. Осипов // Междунар. науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС». — 2011. — С. 88–92.
18. Chang K. Y. Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS / K. Y. Chang, S. S. He, C. C. Chou, S. L. Kao, A. S. Chiou // International Journal of Geographical Information Science. — 2015. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.
19. Ключев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // 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.

## REFERENCES

1. Katsman, F. M., and A. A. Ershov. "Avariinost' morskogo flota i problemy bezopasnosti sudokhodstva." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 5(5) (2006): 82–84.
2. Fisenko, A. "Risks of shipping for Northern sea route." *Transport business of Russia* 6 (2015): 260–262.
3. *Problemy Severnogo morskogo puti*. Sovet po izucheniyu proizvodstvennykh sil RAN; Tsentral'nyi nauch.-issledovatel'skii i proektno-konstruktorskii institut morskogo flota (TsNIIMF). M.: Nauka, 2006.
4. Komkov, N.I., V.S. Selin, and V.A. Cukerman. "Direction of modernization of the arctic marine transportation system." *MIR (Modernization. Innovation. Research)* 20 (2014): 4–11.
5. Lebedev, G.V., and G.E. Rumyantsev. "The prospects of Arctic marine transportation system's development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 179–189.
6. Olerskii, V. "Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti." *Transportnaya strategiya - XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.
7. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
8. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. "Assessment and prediction of dangerous navigational situations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 2 (2013): 98–100.
9. Mikhalskii, V.A., and M.V. Tyul'kin. "Otsenka navigatsionnoi bezopasnosti plavaniya vblizi tochechnykh opasnostei." *Navigatsiya i gidrografiya* 23 (2006): 17–26.
10. Burakovskii, E.P., P.E. Burakovskii, and V.A. Dmitrovskii. "K voprosu ob otsenke riskov posadki sudna na mel'." *Izvestiya KGTU* 29 (2013): 159–164.
11. Sazonov, Cyril E., and Alexander V. Ryzhkov. "Shallow water impact on ice performance of the ships." *World of transport* 11.4(48) (2013): 40–47.
12. Spirin, A.N., D.A. Chachin, and A.A. Smirnov. "Year-round navigation in the port of Sabetta." *Arctic: Ecology and Economics* 3(19) (2015): 88–95.

13. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.
14. Kondratenko, Aleksandr Alekseevich, Andrej Borisovich Krestyantsev, Oleg Vladimirovich Tarovik, and Aleksandr Grigor'evich Topaj. "Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience." *Arctic: ecology and economy* 1(25) (2017): 86–101.
15. Topazh, A.G., O.V. Tarovik, A.V. Kosorotov, and A.A. Bakharev. "Programmnyi kompleks imitatsionnogo modelirovaniya dlya proektirovaniya i analiza morskikh transportnykh system." *V sbornike trudov konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem-IKM MT-MTS-2015»*. SPb., 2015: 143–147.
16. Tsvetkov, Misha, and Dmitriy Rubanov. "An Intelligent GIS-Based Approach to Vessel-Route Planning in the Arctic Seas." *Information Fusion and Intelligent Geographic Information Systems (IF&IGIS'17)*. Springer, Cham, 2018: 71–86. DOI: 10.1007/978-3-319-59539-9\_6.
17. Osipov, V.Yu. "Modelirovanie morskikh transportnykh sistem na osnove intellektual'nykh geoinformatsionnykh system." *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem» – «IKM MTMTS»*. 2011: 88–92.
18. Chang, K.Y., S.S. He, C.C. Chou, S.L. Kao, and A.S. Chiou. "Route planning and cost analysis for traveling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS." *International Journal of Geographical Information Science* 29.8 (2015): 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.
19. 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.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **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](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

##### **Афонин Андрей Борисович —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [andrey.afonin.gma@yandex.ru](mailto:andrey.afonin.gma@yandex.ru),  
[kaf\\_gm@gumrf.ru](mailto:kaf_gm@gumrf.ru)

##### **Тезиков 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: [altezikov@yandex.ru](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Olhovik, 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](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

##### **Afonin, Andrej B. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [andrey.afonin.gma@yandex.ru](mailto:andrey.afonin.gma@yandex.ru),  
[kaf\\_gm@gumrf.ru](mailto:kaf_gm@gumrf.ru)

##### **Tezikov, 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: [altezikov@yandex.ru](mailto:altezikov@yandex.ru), [TezikovAL@gumrf.ru](mailto:TezikovAL@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.  
Received: January 15, 2018.

## IMPROVEMENT OF OPERATIONAL SAFETY AND RELIABILITY OF PORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES TO THE LIQUEFACTION OF SAND SOILS OF THE BASES BY A NEW VIBRATION METHOD DEPTH COMPACTION

**O. P. Minaev**

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

*Sandy grounds are widely used to form new and expand existing areas of port hydraulic structures. Increase of operational safety and reliability of port hydraulic structures to the process of liquefaction of sand soils of ground, prevention of uneven sediments and subsidence of ground, formation of caverns and cavities in sandy backfilling and foundation of port facilities under static and especially dynamic (seismic) loads can be ensured by their compaction. This prevents unacceptable deformations and destruction of buildings and structures of the port complex, reliable operation of lifting cranes, stability of the fencing and berthing facilities of the embankments of ports, etc. The article presents the results of theoretical substantiation on the analytical calculation model developed by the author of the article and field tests of the method of deep vibro compaction of bases with a known vibroinstallation, showing its shortcomings. These shortcomings were most clearly manifested when compacting a thick layer of sandy bases (9 m and more). The article also shows that the shortcomings of a well-known vibration plant can be excluded or significantly reduced by using a vibrating packer with radial elements placed at a given height at the bottom of the seal rod. This allows to increase the technical characteristics of the vibration plant by increasing the depth of compaction by a factor of 1.5 – 2. In the experimental tests, an improvement in the uniformity of compacting has been achieved to the values of the relative density of the soil base deposits  $I_D$  from 0.5 to 0.8 in depth and in the radius of action of the sealant. At the same time, a significant increase in the physical and mechanical characteristics of the small and medium sands of the bases was achieved: up to values of the elastic modulus  $E$  within 30-40 MPa and an internal friction angle of 32 ... 34 degrees. The developed new method for deep compaction of sand bases with a more modern vibro installation is recommended to be carried out with a reliable and economical VPP-2 vibrator for Russian production. This vibrator can be also successfully used in port hydraulic engineering for dipping the tongue to a depth of at least 12-15 m. In recent years, the main results of the theoretical and experimental studies of the author of the article have been confirmed by independent studies of German specialists. These theoretical and experimental studies of German specialists are based on the compaction of sandy base grounds to a depth of up to 10 m by a vibrating fleet created on the basis of a heavy deep-sea vibrator.*

*Keywords: safety, reliability, hydraulic engineering structures, vibration method, vibrating installation, sand bases, deep compaction, liquefaction soil, modernized sealant, new method compaction.*

### For citation:

Minaev, Oleg P. "Improvement of operational safety and reliability of port hydrotechnical structures to the liquefaction of sand soils of the bases by a new vibration method depth compaction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 106–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-106-121.

**УДК 624.2:624.131.3:624.138.22**

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗЖИЖЕНИИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НОВЫМ ВИБРАЦИОННЫМ СПОСОБОМ ГЛУБИННОГО УПЛОТНЕНИЯ

**О. П. Минаев**

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



Для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений широко применяются песчаные грунты. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процесса разжижения песчаного грунта, предотвращение неравномерных осадок и просадок грунта, образования каверн и полостей в песчаной засыпке и основании портовых сооружений при статических и особенно динамических (сейсмических) нагрузках может быть обеспечено их уплотнением. Тем самым предотвращаются недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечивается надежная работа грузоподъемных кранов, устойчивость оградительных и причальных сооружений набережных портов и т. п. В статье приведены результаты теоретического обоснования на примере разработанной аналитической расчетной модели и полевых испытаний метода глубинного виброуплотнения оснований с помощью известной виброустановки, показывающие её недостатки. Данные недостатки наиболее ярко проявились при уплотнении мощной толщи песчаных оснований (9 м и более). В статье также показано, что недостатки известной виброустановки могут быть исключены или существенно снижены путем применения виброуплотнителя с размещением радиальных элементов на заданной высоте в нижней части штанги уплотнителя. Это позволяет повысить технические характеристики виброустановки путем увеличения глубины уплотнения в 1,5 – 2 раза. В опытных испытаниях достигнуто улучшение равномерности уплотнения до значений относительной плотности сложения грунтов основания  $I_D$  от 0,5 до 0,8 по глубине и в радиусе действия уплотнителя. При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик мелких и средних песков оснований: до значений модуля упругости  $E$  в пределах 30 ... 40 МПа и угла внутреннего трения  $\varphi = 32 - 34^\circ$ . Разработанный новый способ глубинного уплотнения песчаных оснований с более современной виброустановкой рекомендуется осуществлять с надежным и экономичным вибропогружателем ВПП-2 российского производства. Данный вибропогружатель может также успешно применяться в портовом гидротехническом строительстве для погружения шпунта на глубину не менее 12 – 15 м. В последние годы основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора статьи были подтверждены независимыми исследованиями немецких специалистов, основанными на уплотнении песчаных грунтов оснований на глубину до 10 м «Виброфлотом» с помощью виброуплотнителя, созданного на базе тяжелого глубинного вибратора.

**Ключевые слова:** безопасность, надежность, гидротехнические сооружения, вибрационный метод, вибрационная установка, песчаные основания, глубинное уплотнение, разжижение грунта, модернизированный уплотнитель, новый способ уплотнения.

**Для цитирования:**

Минаев О. П. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений при разжижении песчаных грунтов оснований новым вибрационным способом глубинного уплотнения / О. П. Минаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 106–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-106-121.

## Введение (Introduction)

Песчаные грунты широко применяются для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных [1] – [4].

При этом опыт строительства комплекса защитных сооружений (КЗС) г. Санкт-Петербурга от наводнений, портов в Северо-Западном регионе России (г. Санкт-Петербург и Ленинградская область), таких как многофункциональные морские перегрузочные комплексы (ММПК) «Бронка» и «Кронштадт» в районе КЗС (рис. 1 и 2), Морской торговый порт Усть-Луга и нефтеналивной терминал Приморск, показывают, что мощности грунтов песчаной отсыпки и подводного намыва достигают значительных величин. Так, самый глубоководный порт «Бронка» Большого порта Санкт-Петербурга позволяет принимать судна длиной до 547 м, шириной до 50 м и осадкой до 13 м, а крупнейший нефтеналивной терминал «Приморск» имеет максимальную глубину у причала 18,2 м. Разжижение водонасыщенных песчаных грунтов оснований таких массивов грунта является наиболее опасным явлением для сооружений и зданий различных гидротехнических сооружений при техногенных динамических воздействиях и землетрясениях.





Рис. 1. Местоположение многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка» Большого порта Санкт-Петербурга



Рис. 2. План-схема ММПК «Бронка» с видом выхода на КАД комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений

Проведение первых детальных исследований процесса разжижения песчаных грунтов, их консолидации и динамического уплотнения взрывным методом началось в середине прошлого века под руководством проф. П. Л. Иванова применительно к строительству крупных плотин на песчаных основаниях [5], [6]. Эти исследования базировались на теории консолидации грунтов, созданной проф. В. А. Флориным.

За рубежом, в особенности в США и Японии, ведутся масштабные исследования явления разжижения грунтов оснований и сооружений [7] – [12]. Данные исследования проводились в США проф. Seed H. B. и были продолжены его учениками проф. I. M. Idriss и проф. R. W. Boulanger [6] – [8]. Многолетние исследования проф. К. Ishihara (Япония) были обобщены ученым в монографии «Поведение грунтов при землетрясениях» (СПб., 2006, пер. на рус. яз.) [9].

Наиболее действенным способом повышения техногенной и сейсмической безопасности и надёжности при разжижении грунтов оснований и сооружений является их уплотнение [13]. Для этого имеются различные динамические методы уплотнения: взрывной, тяжёлыми трамбовками и вибрационный глубинными уплотнителями. В настоящее время применение указанных методов в зарубежной строительной практике основано на разработках российских специалистов 50 – 60-х гг. XX в.

В частности, в 1960 г. в России во ВНИИГС (Всесоюзный НИИ гидромеханизации, санитарно-технических и специальных строительных работ) был создан пространственный уплотнитель продольного вибрирования, получивший в дальнейшем общепринятое название «виброёлочка», для глубинного уплотнения песчаных оснований [14]. Данный уплотнитель изготавливался из трубчатой штанги, которую с целью повышения производительности путем увеличения радиуса действия уплотнителя вдоль ее длины снабжали радиальными элементами для придания уплотнителю пространственной структуры.

Пространственная структура представляет собой многоярусную систему, напоминающую «ёлочку», содержащую в каждом ярусе по четыре крестообразно расположенных и приваренных к штанге пластинчатых элемента, имеющих в вертикальной плоскости форму трапеции, сужающейся к внешней окружности. Высота участка штанги с пространственной структурой задается равной проектной глубине уплотняемого грунта основания. Для искусственного насыщения водой уплотняемого грунта основания непосредственно в процессе работы уплотнителя трубчатая штанга снабжена в нижнем конце соплом и в верхней части патрубком для подачи под давлением воды в грунт основания. Уплотнитель через фланец в верхней части трубчатой штанги жестко соединен болтами с вибропогружателем.

В качестве вибропогружателя использовался вибропогружатель с подрессоренной пригрузкой (ВПП-2) в настоящее время производственной марки В-402 (В-402ВЧ). Вибропогружатель ВПП-2 был разработан российскими учеными проф. О. А. Савиновым и А. Я. Лускиным [15]. Данный вибропогружатель состоит из двух составных частей: вибрирующей части и пригрузочной массы, изолированной от вибрации. В вибрирующую часть входит вибратор и наголовник, а в изолированную (пригрузочную) от вибрации — электродвигатель и пригрузочные плиты. При этом обе части соединяются системой пружин.

Вибропогружатель ВПП-2 с электроприводом широко использовался в строительстве в различных странах мира в основном для погружения шпунта в водонасыщенные песчаные и слабые глинистые грунты оснований, а также для виброуплотнения рыхлых грунтов песчаных оснований и сооружений пространственным виброуплотнителем продольного вибрирования. Несмотря на высокую конкуренцию с современными мощными вибропогружателями с гидравлическим приводом зарубежного производства, он продолжает выпускаться на Охтинском заводе строительных машин в г. Санкт-Петербурге.

Собранная вибрационная установка, включающая вибропогружатель и уплотнитель, подвешивается на крюке крана. Процесс уплотнения описанной вибрационной установкой на заданной точке уплотнения основания включает погружение в грунт уплотнителя на заданную глубину с последующим подъемом уплотнителя на поверхность грунта основания. На всем промежутке времени погружения и подъема уплотнителя через сопло в нижнем конце штанги в грунт основания под давлением подается вода. При этом динамическое возбуждение вибропогружателя на песчаную водонасыщенную среду вызывает одновременное воздействие на неё во всем объеме массива грунта в радиусе действия уплотнителя на глубину его погружения. Песок при вибрации уплотняется вследствие более компактной переукладки его части после разжижения.

Уплотнитель типа «виброёлочка» имеет достаточно простую конструкцию, состоящую из сварных деталей, не требующих станочной обработки, что позволяет изготавливать его непосредственно на объекте строительства. В связи с этим уплотнение песчаных грунтов основания виброустановкой конструкции ВНИИГС получило широкое применение как в отечественной, так и зарубежной практике строительства.

Разработанный на основе вибропогружателя ВПП-2 (для погружения и извлечения шпунта) данный метод уплотнения оснований виброустановкой продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброёлочки» применяется для глубинного виброуплотнения песчаных грунтов оснований как водонасыщенных или маловлажных, так и их сочетания. При этом глубина уплотнения грунтов основания такой виброустановкой не превышает 6 м, что является явно недостаточным в современных условиях гидротехнического строительства.

В дальнейшем совершенствование метода глубинного уплотнения грунтов оснований данной виброустановкой во ВНИИГС велось главным образом по пути разработки более мощного вибропогружателя. Для этих целей в этом институте был создан сравнительно более тяжелый вибропогружатель ВШ-1, работающий как в вибрационном, так и в ударно-вибрационном режиме [16]. Ввиду отсутствия теоретического обоснования уплотнения грунтов оснований такой виброустановкой, все разработки ВНИИГС были основаны на результатах опытных испытаний. Известные испытания сопровождались полевыми и лабораторными определениями физико-механических характеристик грунтов оснований, выполненных на лабораторной базе данного научно-исследовательского института.

Поиск других направлений совершенствования данного метода уплотнения потребовал от автора статьи модернизации конструкции виброуплотнителя, облегчающей работу вибропогружателя и повышающей его надежность, а также увеличивающей глубину уплотнения и улучшающей процесс уплотнения грунтов основания. Суть модернизации конструкции виброуплотнителя заключается в размещении его пространственных элементов только в нижней части штанги уплотнителя на заданной высоте уплотнения основания [17], [18].

*Целью статьи* является представление результатов исследований автора, направленных на повышение безопасности и надёжности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения грунта, предотвращению неравномерных осадок и просадок грунта, образованию каверн и полостей в песчаной засыпке и основании портовых сооружений при статических и особенно динамических (сейсмических) нагрузках. Тем самым полученные результаты позволяют предотвратить недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечить надежную работу грузоподъёмных кранов, устойчивость оградительных и причальных сооружений набережных портов и т. п. за счёт уплотнения песчаных грунтов засыпок и оснований портовых сооружений с помощью использования вибрационной установки с модернизированным уплотнителем для реализации нового эффективного вибрационного способа глубинного уплотнения, разработанного автором статьи [18]. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных натурных исследований практического внедрения.

Рассмотренные в статье теоретические и экспериментальные исследования имеют научную и практическую значимость как в части разработки расчётной модели воздействия вибропогружателя на песчаные водонасыщенные грунты основания с помощью пространственного уплотнителя продольного вибрирования, так и в части проведения сравнительных теоретических исследований и опытного подтверждения натурными экспериментальными исследованиями эффективности уплотнения оснований виброуплотнителем модернизированной конструкции, а также практического применения разработанной вибрационной установки и нового способа глубинного вибрационного уплотнения песчаных оснований мощной толщи в производственных условиях на объекте гидротехнического строительства. Об основных результатах данных исследований автором статьи был сделан доклад на 15-й Азиатской региональной конференции по механике грунтов и инженерной геотехнике «Новые инновации и устойчивости» (15ARC), которая была проведена под эгидой японского геотехнического общества (JGS) в г. Фукуока, Япония 9 – 13 ноября 2015 г. [19].



### Методы и материалы исследований (Research methods and materials)

В теоретических исследованиях была разработана аналитическая расчетная модель воздействия вибропогружателя на песчаные водонасыщенные грунты основания с помощью пространственного уплотнителя продольного вибрирования. В соответствии с исследованиями проф. О. А. Савинова и проф. И. И. Блехмана [20], [21] для сыпучей среды наилучшее уплотнение имеет место при условии

$$A\omega^2 = (0,9 - 1)g, \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда вибрации;  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $g$  — ускорение свободного падения.

Известно [17], что для вязких сред амплитуда вибрации убывает с расстоянием  $x$  от источника колебаний по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2)$$

или при условии, что

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}},$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкой среды.

В результате выполненных преобразований можно записать

$$A = A_0 e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}}. \quad (3)$$

Формула (2) справедлива также для рассматриваемой уплотняемой водонасыщенной песчаной среды, если под  $\nu$  и  $\delta$  понимать экспериментально определяемые коэффициенты.

На расстоянии  $x = r$  от источника колебаний при заданном значении круговой частоты колебаний  $\omega$  критическая амплитуда колебаний  $A = A_r$ , т. е. минимально допустимая для полного разжижения грунта в уплотняемой зоне, убывает по экспонентному закону, так что

$$A_r = A_0 e^{-\frac{r}{\delta}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) имеем

$$\ln \frac{A_r}{A_0} = -\frac{r}{\delta}, \quad (5)$$

откуда определяется, что

$$\delta = -\frac{r}{\ln \frac{A_r}{A_0}} = \frac{r}{\ln \frac{A_0}{A_r}}. \quad (6)$$

Известно, что

$$A_0 \approx \frac{P_0}{m\omega^2} = \frac{P_0}{m(2\pi f)^2}, \quad (7)$$

где  $P_0$  — вынуждающая сила вибропогружателя;  $m$  и  $f$  — соответственно масса вибрирующего элемента и частота его колебаний.

С учетом динамического сопротивления  $P^{\text{дин}}$  погружению вибрирующего элемента уплотнителя формула (7) приобретает вид

$$A_0 = \frac{P_0 - P^{\text{дин}}}{m\omega^2} = \frac{P_0 - (P_{\text{тр}}^{\text{дин}} + P_{\text{лоб}}^{\text{дин}})}{(m_{\text{в}} + m_{\text{упл}})(2\pi f)^2}, \quad (8)$$

где  $m_{\text{в}}$  и  $m_{\text{упл}}$  ( $m_{\text{упл}}^*$ ) — соответственно масса вибропогружателя и уплотнителя конструкции ВНИИГС (модернизированной конструкции);  $P_{\text{тр}}^{\text{дин}}$  и  $P_{\text{лоб}}^{\text{дин}}$  — сила динамического сопротивления, соответственно, трению по боковой поверхности уплотнителя и лобовому его погружению, кН.

Как известно из исследований проф. М. Г. Цейтлина и проф. В. В. Верстова [16], в том числе и из исследований автора статьи [17], при динамическом погружении свай в водонасыщенные песчаные грунты за счет встряхивания и возникновения избыточного порового давления происходит снижение эффективного сопротивления грунта сдвигу и временное уменьшение сопротивления погружению сваи. В частности, силы динамического сопротивления при вибропогружении (извлечении) меньше соответствующих статистических в водонасыщенных песках по трению на боковой поверхности в 4,5 – 6 раз и лобовому погружению в 2,5 – 3 раза.

Согласно исследованиям М. Г. Цейтлина, амплитуда колебаний от источника уменьшается пропорционально частоте, поэтому при какой-то исходной  $\omega_0$  запишем

$$r = \delta \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}} \ln \frac{A_{0\text{исл}}}{A_r}, \quad (9)$$

где  $A_{0\text{исл}}$  — амплитуда колебаний уплотнителя с учетом сил динамического бокового и лобового сопротивлений погружению уплотнителя в грунты уплотняемого основания на глубине погружения уплотнителя, равной  $h_{\text{сл}}$ , т. е. с увеличением круговой частоты колебаний  $\omega$  эффективное расстояние от источника колебаний убывает.

Необходимые для расчетов технические характеристики вибропогружателя В-402 выбираются из таблицы, а виброустановки ВУУП-6 принимаются согласно [16].

#### Сравнительные характеристики вибропогружателей В-402 и ВШ-1 конструкции ВНИИГС

| № п/п. | Показатель                                            | Марка                       |                          |
|--------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|        |                                                       | В-402<br>В-402ВЧ<br>(ВПП-2) | ВШ-1<br>ВШ-1М            |
| 1      | Номинальная мощность приводного электродвигателя, кВт | 55                          | 44 (22 × 2)              |
| 2      | Статический момент массы дебалансов, кг · см          | 1200, 600                   | 2500                     |
| 3      | Частота колебаний, Гц                                 | 24,33                       | 13, 16, 20               |
| 4      | Максимальная амплитуда вынуждающей силы, кН           | 270,256                     | 400                      |
| 5      | Усилие полного сжатия пружин амортизатора, кН         | 120                         | 290                      |
| 6      | Тип наголовника                                       | Клиновой, гидравлический    | Клиновой, гидравлический |
| 7      | Масса вибрирующей (ударной) части, кг                 | 940                         | 3000                     |
| 8      | Общая масса, кг                                       | 2710                        | 5000                     |
| 9      | Габаритные размеры, мм:<br>– в плане<br>– высота      | 1550 × 1 095<br>1980        | 1280 × 1250<br>2740      |

Примечание. ВПП-2, В402, В402ВЧ — вибрационные машины; ВШ-1 и ВШ-1М — вибрационные машины с перенастройкой (при необходимости) на ударно-вибрационный режим.

Для определения увеличения пористости грунта при виброуплотнении, по аналогии с зависимостью проф. В. А. Флорина для консолидации разжиженного слоя грунта под действием только гравитационных сил [6], можно записать

$$n_2 = n_1 - \frac{t_{\text{упл}}}{r_1} (1 - n_1) K_{\phi 1}, \quad (10)$$

где  $n_2$  и  $n_1$  — соответственно конечная и начальная пористость грунта;  $t_{\text{упл}}$  — время послойного виброуплотнения грунта, с;  $K_{\phi 1}$  — начальный коэффициент фильтрации уплотняемого слоя грунта, м/с;  $r_1 = 1$  м — толщина уплотняемого слоя грунта, эквивалентная одному метру.



Данная формула была применена проф. П. Л. Ивановым при определении времени уплотнения основания при взрывном методе уплотнения песчаных оснований [6]. Однако, согласно мнению автора статьи, процессы консолидации водонасыщенных песчаных оснований при виброуплотнении и уплотнении взрывами существенно отличаются, и задаваемое в формуле (10) время виброуплотнения грунта должно быть скорректировано с учетом постоянного градиента напора поровой воды разжиженного слоя грунта основания в процессе виброуплотнения. Для этого используется зависимость, заимствованная из работы [6], для уплотнения грунтов основания под действием фильтрационных сил следующего вида:

$$t_{\text{упл}}^* = \frac{\gamma_w}{\gamma_{\text{взв}}} \frac{r_1}{K_{\phi 1}} \frac{n_1 - n_2}{1 - n_1} \left( \frac{1}{1 - \frac{K_{\phi 2}}{K_{\phi 1}(1 - n_1) \frac{p_1}{\gamma_{\text{взв}} h}}} \right), \quad (11)$$

где  $p_1$  — градиент напора в пределах разжиженного слоя грунта;  $K_{\phi 2}$  — коэффициент фильтрации переукладываемой части грунта, принимаемый равным конечному значению коэффициента фильтрации после виброуплотнения переукладываемого слоя грунта.

Приняв  $\gamma_w \approx \gamma_{\text{взв}}$  и  $p_1 = \gamma_{\text{взв}} h$ , а также с учётом того, что в результате уплотнения можно уменьшить коэффициент фильтрации песков от полупорядка до порядка [6], в формуле (11) вместо  $t_{\text{упл}}$  может быть принято  $t_{\text{упл}}^* = (2 - 3)t_{\text{упл}}$ .

Для полученных значений пористости при определенных граничных значениях плотности грунта в рыхлом  $\rho_d^{\text{рыхл}}$  и плотном  $\rho_d^{\text{плотн}}$  сложениях по формуле

$$I_D = \frac{\rho_d^{\text{max}} (\rho_d - \rho_d^{\text{min}})}{\rho_d (\rho_d^{\text{max}} - \rho_d^{\text{min}})} \quad (12)$$

с использованием зависимости

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (13)$$

где  $\rho_s = 2,65 \text{ г/см}^3$  — плотность частиц грунта;  $\rho_d$  — плотность скелета грунта, может быть вычислена относительная плотность  $I_D$  грунта основания до и после уплотнения.

Для проведения сравнительных численных расчетов достигаемой плотности грунтов основания в качестве основополагающего был принят график времени воздействия виброустановки конструкции ВНИИГС на грунты основания, приведенный на рис. 3, где также показаны графики для модернизированной виброустановки при размещении пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя на высоте, равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения.

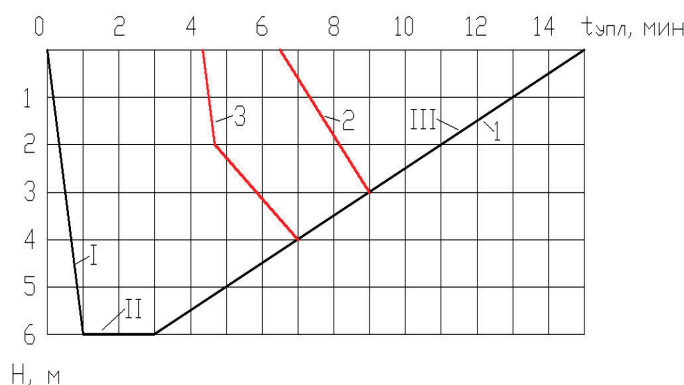


Рис. 3. Графики времени вибровоздействия виброустановки на грунты ее основания:

1 — виброустановка конструкции ВНИИГС; 2 и 3 — модернизированные виброустановки при высоте размещения пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя, соответственно, равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения; I — стадия погружения уплотнителя; II — стадия выдержки на заданной глубине уплотнения; III — стадия подъема уплотнителя

В опытных испытаниях на строительстве комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений первоначально была апробирована виброустановка этой конструкции ВНИИГС, включающая вибропогружатель ВШ-1 и уплотнитель длиной 11,2 м из толстостенной трубы диаметром 133 мм, к которой по всей длине приварены горизонтальные ребра с шагом до 500 мм. С учетом этих ребер диаметр пространственного уплотнителя составил 700 мм. Для облегчения внедрения уплотнителя в грунт основания трубчатая штанга снабжалась крестообразным наконечником на ее острие. Вода к патрубку подавалась насосом с максимальной производительностью 300 м<sup>3</sup>/ч с напором 90 м вод. ст. и возможностью регулирования этих параметров с помощью заслонки, установленной в системе забора воды. В качестве базовой машины использовался кран грузоподъемностью 25 т.

Опытному уплотнению подвергались мелкие и средние пески основания на отсыпанной грунтовой дамбе до отметки около 4 м выше нулевого ординара. При этом глубина подводной отсыпки указанных песков составляла 5 м. Гранулометрический состав песков, уложенных в тело дамбы, представлен на рис. 4.

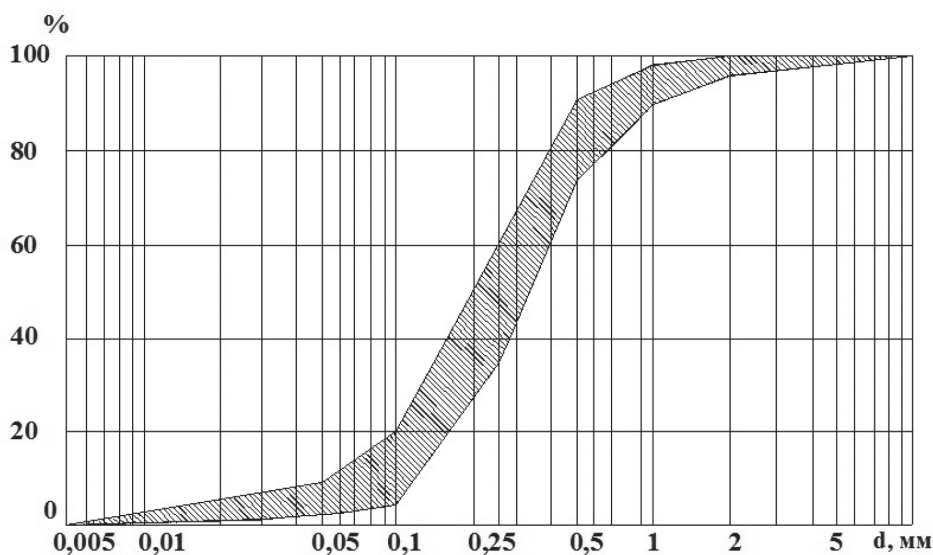


Рис. 4. Гранулометрический состав уложенного песчаного грунта в тело дамбы по данным отбора проб грунта из буровых скважин

Однако при дальнейшем уплотнении основания выявилась невысокая надежность этой виброустановки из-за частого выхода из строя вибропогружателя. Поэтому конструкция уплотнителя была видоизменена и проведены новые опытные работы по уплотнению грунтов основания на том же участке дамбы, модернизированной виброустановкой.

Результатом сравнительных натурных исследований виброустановки данной конструкции ВНИИГС и модернизированной конструкции виброуплотнителя явилось видоизменение конструкции уплотнителя, которое заключалось в срезке верхних горизонтальных ребер и сохранении их только на участке в 3,5 – 4,5 м в нижней части штанги. На основе результатов теоретических исследований был сделан вывод о том, что такое изменение конструкции уплотнителя позволяет облегчить работу вибропогружателя за счет потерь на внедрение и вибрирование горизонтальных ребер уплотнителя в поверхностном слое увлажненного грунта, оставшиеся ребра должны были обеспечить сохранение его уплотняющей способности в области подачи воды.

#### Результаты исследований (Research result)

На первом этапе теоретических исследований, используя зависимости (1) – (9), были определены исходные амплитуды и зона уплотнения по глубине погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС, погружаемого вибропогружателем ВПП-2, в зависимости от значений сопротивления тре-

нию по боковой поверхности уплотнителя и лобового сопротивления его погружению. Полученные расчетные значения свидетельствуют о том, что при достигаемой глубине уплотнения, равной 6 м, зона уплотнения грунта вокруг «виброёлочки» увеличивается с 3 м до 4,06 м при приближении уплотнителя к поверхности грунтового основания. Аналогичные расчеты для виброустановки с модернизированным уплотнителем при сокращении количества пространственных элементов уплотнителя в три раза представлены кривыми графиков на рис. 5.

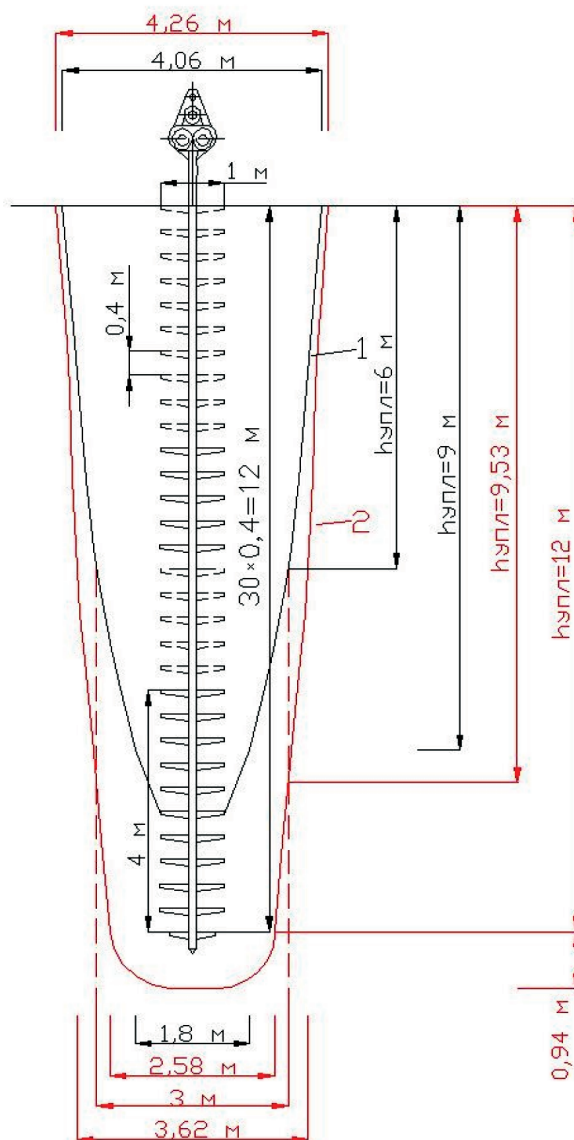


Рис. 5. Графики зон уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов основания средней крупности на глубину 12 м виброустановкой модернизированной конструкции (1) и уменьшения зоны уплотнения грунта и глубины погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС (2)

Из рис. 5 видно, что глубина уплотнения грунта увеличивается с 6 м (см. рис. 5, график 1) в виброустановке конструкции ВНИИГС до 9,53 м (см. рис. 5, график 2) при использовании модернизированного уплотнителя и сохранении размеров зоны уплотнения, равной 3 м для обоих типов уплотнителей, при прочих равных параметрах. При этом модернизированный уплотнитель позволяет увеличить глубину уплотнения основания до 12 м и более. Так, полученную расчетным путем на глубине 12 м зону уплотнения, равную 2,58 м (см. рис. 5, график 2), можно считать вполне приемлемой для эффективного применения виброустановки на заданную глубину уплотнения грунтов.

Проведенные аналогичные расчеты для установки конструкции ВНИИГС показали, что диаметр зоны уплотнения на глубине 9 м сокращается до 1,8 м, что является меньше необходимого (по данным ВНИИГС) минимального предела в 2 м (см. рис. 5, график 1). При этом уплотнитель данной конструкции на глубину 12 м вообще не может быть погружен.

Проведенными по формулам (10) – (13) расчетами достигаемой плотности грунтов основания было установлено, что при использовании установки конструкции ВНИИГС за счет большой разницы (до 7,5 раз и более) во времени виброуплотнения нижележащих слоев грунта по сравнению с вышележащими слоями существенно изменяется (от 0,41 до 0,33) пористость грунта в пределах заданной глубины уплотнения основания. При этом относительная плотность сложения грунта  $I_D$  изменяется от 0,3 до 0,9, а перепад данных по  $n$  и  $I_D$  достигает значений 0,08 и 0,6 соответственно.

При применении модернизированного виброуплотнителя путем сокращения максимально-го времени виброуплотнения примерно в два раза можно уменьшить разницу значений пористости по глубине уплотняемого основания до 0,03 – 0,04 при прочих равных условиях, тем самым значительно повысив равномерность уплотнения грунта в пределах заданной глубины.

Расчеты также показали, что при увеличении заданной глубины уплотнения данные показатели могут только ухудшаться у виброуплотнителя конструкции ВНИИГС, тогда как при использовании модернизированного виброуплотнителя имеется реальная возможность как увеличить минимально достигаемое значение пористости грунта от значения 0,41 до величин, равных 0,38 – 0,37 и менее, так и сократить их разницу по заданной глубине уплотняемого основания до значений, не превышающих 0,01 – 0,02. Все это позволяет модернизированным уплотнителем обеспечить достижение проектной плотности песчаного грунта  $I_D \geq 0,6$  на заданную глубину основания и существенно улучшить равномерность уплотнения грунта в пределах уплотняемой толщи основания.

В результате экспериментальных исследований установки конструкции ВНИИГС было установлено, что после погружения и извлечения уплотнителя в грунты песчаного основания вокруг него появляется воронка оседания глубиной 0,8 – 1,2 м и диаметром 1,5 – 2 м. Данные статического зондирования показали, что грунт в целом уплотнялся в радиусе до 3 м от центра уплотнителя на глубину до 9 м. Наиболее значительное уплотнение водонасыщенных песков ниже ординара происходило вблизи от центра уплотнителя, а уже на расстоянии 0,5 м от него снижалось. При этом в центральной зоне происходило разрыхление поверхностного слоя песка на глубину 1,5 – 2 м и более в результате размыва грунта напором воды при вытаскивании уплотнителя. Попытка прекращения подачи воды при вытаскивании уплотнителя из песчаного основания приводила к его заклиниванию в грунте.

Испытания модернизированного уплотнителя с вибропогружателем В-401 производились при шаге погружения  $3 \times 3$  м. При этом применялся кран, гораздо меньшей грузоподъемности. По данным статического зондирования, глубина уплотнения основания составила 9 м. При этом достигалось более равномерное уплотнение грунта как в центральной зоне вокруг уплотнителя, так и в радиусе 1,5 м от него. Кроме того, грунт не разрыхлялся в центральной зоне вокруг уплотнителя.

Отбор образцов грунта режущим кольцом в промежутках между воронками оседания на глубину до 1,5 м от поверхности основания показал, что плотность скелета грунта составила 1,62 г/см<sup>3</sup> при 90 %-й обеспеченности и 1,69 г/см<sup>3</sup> при 50 %-й обеспеченности. Снижение плотности грунта при удалении от центра погружения уплотнителя не было отмечено. Учитывая, что по данным лабораторных исследований плотность сухого грунта в рыхлом сложении составляла в среднем  $\rho_d^{\text{рыхл}} = 1,49$  г/см<sup>3</sup>, а в плотном —  $\rho_d^{\text{плотн}} = 1,81$  г/см<sup>3</sup>, по зависимости (12) была определена относительная плотность  $I_D$  грунтов основания, равная, соответственно, 0,45 и 0,67. Подтверждением являются также полученные данные статического зондирования по оси погружения уплотнителя, приведенные на рис. 6.

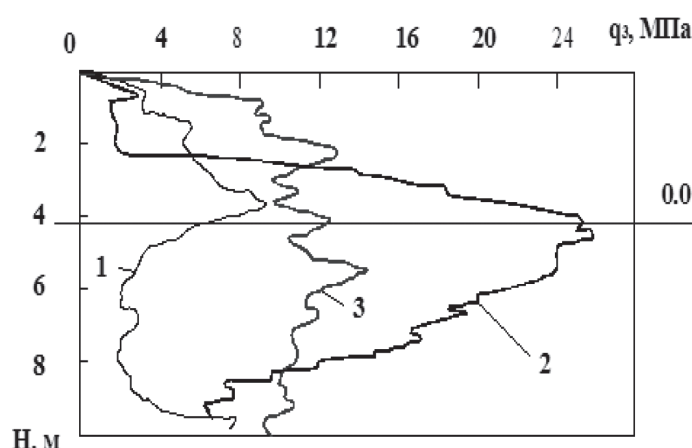


Рис. 6. Сравнительные данные статического зондирования основания: 1 — до уплотнения; 2, 3 — по оси виброуплотнителя после уплотнения виброустановкой конструкции ВНИИГС (2) и модернизированной конструкцией (3)

На рис. 6 видно, что до уплотнения сопротивлению внедрению острия зонда  $q_3$  в надводной зоне составляло от 3,5 до 8 МПа, в подводной зоне — от 2,5 до 8 МПа. После уплотнения установкой конструкции ВНИИГС разброс данных по  $q_3$  в целом и в надводной зоне составил от 1,5 до 25,5 МПа, в том числе в подводной зоне — от 6,5 до 25,5 МПа. Причем повышение  $q_3$  в нижележащем слое основания не превышало 6,5 МПа, а на глубину до 2 м от поверхности основания произошло снижение  $q_3$  с 3,5 – 5,5 МПа до 1,5 – 3 МПа.

По данным статического зондирования (рис. 6), после уплотнения модернизированной установкой сопротивление внедрению острия зонда  $q_3$  повысилось в целом по всей глубине обрабатываемого слоя основания до 9 – 14 МПа.

Согласно существующим правилам на инженерно-геологические изыскания, в строительстве в России было определено, что данные значения  $q_3$  соответствуют величинам относительной плотности грунтов основания в пределах  $I_D = 0,48 – 0,76$ . При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик грунтов оснований: модуля упругости  $E$  с 6 – 24 МПа до 27 – 42 МПа, угла внутреннего трения  $\varphi$  с  $26 – 32^\circ$  до  $32 – 34^\circ$ . Таким образом, данные по  $I_D$  характеризуют пески мелкие и средние как средней плотности и плотные. Это обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов оснований зданий и сооружений от большинства динамических, в том числе сейсмических воздействий [22].

Виброустановкой с модернизированным уплотнителем, погружаемой вибропогружателем ВПП-2, было произведено уплотнение верхового откоса дамбы в основании скоростной автодороги, уплотнение песчаного заполнителя балластов наплавных ворот судопропускных сооружений и других объектов на строительстве КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений. Объем внедрения на различных объектах только на строительстве КЗС составил не менее 1,0 млн куб. м уплотненного грунта. Следует отметить, что в ходе строительства КЗС впервые в строительной практике данная виброустановка была применена для уплотнения больших объемов (около 300 тыс. м<sup>3</sup>) грунта на одном объекте строительства.

### Обсуждение (Discussion)

В последние годы основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора статьи были подтверждены независимыми исследованиями немецких специалистов [23]. Данные теоретические и экспериментальные исследования немецких специалистов основаны на уплотнении песчаных грунтов оснований на глубину до 10 м виброуплотнителем, созданным на базе тяжелого глубинного вибратора с подачей воды в зону уплотнения по системе труб, называемым специалистами «виброфлотом».



Следует отметить, что метод глубинного виброуплотнения песчаных грунтов на глубину 15 м с использованием пакета глубинных тяжелых вибраторов (пакета «Виброфлотов») давно известен российским гидротехникам по опыту его использования в разработках российских специалистов вибротехников на строительстве Асуанской плотины в Египте [24].

### Выводы (Summary)

1. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений в процессе разжижения песчаных грунтов, как правило, используемых для образования новых и расширения существующих территорий, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных, может быть обеспечено их уплотнением.

2. В настоящее время в России разработаны принципиально новые способы уплотнения грунтов оснований, позволяющие наряду с достижением большей глубины уплотнения обеспечить лучшую равномерность уплотнения грунта по глубине уплотняемой толщи.

3. Российская виброустановка продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброёлочки» широко применялась для уплотнения песчаных грунтов оснований, как водонасыщенных или маловлажных, так и их сочетания. Как показал анализ проведенных исследований, данная виброустановка обладает недостатками, которые особенно проявились при опытных испытаниях виброустановки конструкции ВНИИГС по уплотнению мощного девятиметрового слоя грунта (5 м водонасыщенного грунта в подводной зоне, перекрытого четырехметровым слоем маловлажных грунтов) тела песчаной дамбы.

4. Недостатки известной виброустановки могут быть исключены или существенно снижены путем применения уплотнителя с размещением радиальных элементов на заданной высоте, в нижней его части.

5. Теоретические исследования, проведенные на разработанной расчетной модели «вибропогружатель – уплотнитель – грунт основания», показали, что данное усовершенствование позволяет не менее чем в 1,5 – 2 раза увеличить глубину уплотнения основания, обеспечив достижение заданных значений плотности грунта основания  $I_D \geq 0,6$ . При применении модернизированного виброуплотнителя можно уменьшить разницу значений пористости по глубине уплотняемого основания до 0,01 – 0,02 и тем самым значительно улучшить равномерность уплотнения грунта в пределах заданной глубины.

6. Проведенные полевые испытания и опытное уплотнение в производственных условиях подтвердили, что данное решение позволяет не только обеспечить более легкое внедрение уплотнителя в грунт основания и его виброизвлечение, но и сохранить уплотняющую способность уплотнителя и улучшить равномерность уплотнения грунта основания по всей проектной глубине уплотнения. При применении модернизированного виброуплотнителя, по данным статического зондирования и отбора проб грунта, относительная плотность сложения грунта основания  $I_D$  изменялась от 0,5 до 0,8 по всей глубине и в радиусе эффективного действия виброустановки с модернизированным уплотнителем. При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик мелких и средних грунтов оснований: до значений модуля упругости  $E$  в пределах 30 – 40 МПа и угла внутреннего трения  $\varphi = 32 - 34^\circ$ .

7. Рекомендуются использовать вибропогружатель заводской марки В-402 с усовершенствованным уплотнителем при толщине слоя уплотнения 3 – 12 м.

Автор статьи выражает благодарность проф. М. А. Колосову и проф. П. А. Гарибину, которые сфокусировали внимание на большем применении его исследований в области портового гидротехнического строительства, обеспечения его безопасности и надёжности, поскольку эти исследования в целом и были направлены, прежде всего, на повышение эксплуатационной безопасности и надёжности гидротехнического строительства, д-ру физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. вибрационной механики Института проблем машиноведения Российской Академии наук и НПК

«МеханоБрТехника» И. И. Блехману за его помощь при разработке автором теоретической модели системы «вибропогружатель – уплотнитель – грунт основания» для воздействия виброуплотнителя на грунт основания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко Г. Н. Северные порты России / Г. Н. Евтушенко, М. А. Колосов, А. В. Силин, Р. М. Набут. — СПб.: Гидрометеиздат, 2006. — 340 с.
2. Будин А. Я. Городские и портовые набережные / А. Я. Будин. — СПб.: Изд-во «Политехник», 2014. — 424 с.
3. Гарибин П. А. Водные пути и порты. Путевые работы / П. А. Гарибин, Н. Д. Беляев. — СПб.: Изд-во СПбПУ Петра Великого, 2014. — 120 с.
4. Смирнов Г. Н. Порты и портовые сооружения / Г. Н. Смирнов, В. В. Аристархов, С. Н. Левачев. — М.: Изд-во АСВ, 2003. — 464 с.
5. Florin V. A. Liquefaction of Saturated Sandy Soils / V. A. Florin, P. L. Ivanov // Proceeding of the Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — Paris, 1961. — Vol. 1. — Pp. 182–186.
6. Иванов П. Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами / П. Л. Иванов. — М.: Недра, 1983. — 230 с.
7. Seed H. B. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Monograph / H. B. Seed, I. M. Idriss. — USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982. — 320 p.
8. Idriss I. M. Soil liquefaction during earthquakes / I. M. Idriss, R. W. Boulanger. — USA, California: EERI, 2008. — 240 p.
9. Boulanger R. W. Remediation of liquefaction effects for a dam using soil-cement grids: Centrifuge and numerical modeling / R. W. Boulanger, M. Khosravi, A. Khosravi, D. W. Wilson, A. Pulido, W. Yunlong // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Seoul, Korea, 2017. — Pp. 2477–2480.
10. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic. Monograph / K. Ishihara. — USA, Oxford: Clarendon Press, 2006. — 384 p.
11. Towhata I. On ageing of liquefaction resistance of sand / I. Towhata, S. Goto, Y. Taguchi, T. Hayashida, Y. Shintakui, Y. Hamada // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2015. — Vol. 2. — Is. 21. — Pp. 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Kokusho T. Energy-based liquefaction potential compared with stress-based evaluation / T. Kokusho // Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015. — IIT Madras, Chennai, India, 2015. — Pp. 9–18.
13. Минаев О. П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязанных грунтов оснований / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 6. — С. 21–23.
14. Зубков В. М. Способ глубинного уплотнения песчаных оснований / В. М. Зубков, Е. Д. Ковалевский, В. М. Анисимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1983. — № 2. — С. 6–7.
15. Савинов О. А. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве / О. А. Савинов, А. Я. Лускин. — Л.; М.: Госстройиздат, 1960. — 251 с.
16. Цейтлин М. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах / М. Г. Цейтлин, В. В. Верстов, Г. Г. Азбель. — Л.: Стройиздат, 1987. — 262 с.
17. Минаев О. П. Развитие виброметода уплотнения грунтов в строительстве / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2011. — № 4. — С. 39–42.
18. Пат. 2135690 Российская Федерация, МПК E02D 3/054. Способ глубинного виброуплотнения песчаных грунтов / О. П. Минаев, Ю. К. Севенард, Е. М. Перлей, А. И. Соснин; заяв. и патентообл. ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева». — № 98105542/03; заявл. 13.03.1998; опублик. 27.08.1999.
19. Minaev O. P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures / O. P. Minaev // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2015. — Vol. 2. — Is. 80. — Pp. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.

20. Вибрация в технике: справ.: в 6 т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, 1978 – 1981. — Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. — 509 с.
21. Блехман И. И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И. И. Блехман. — СПб.: ИД «Руда и металлы», 2013. — 640 с.
22. Ставницер Л. Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов: монография / Л. Р. Ставницер. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 448 с.
23. Grabe J. Simulation of ground improvement using deep vibration compaction / J. Grabe, E. Heins, T. Hamann // Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015. — IIT Madras, Chennai, India, 2015. — Pp. 281–284.
24. Радченко Г. А. Уплотнение песков Асуанской плотины глубинными вибраторами / Г. А. Радченко // Тр. ЛПИ. — Л.: Ленинградский политехнический ин-т, 1959. — С. 12–21.

## REFERENCES

1. Evtushenko, G.N., M.A. Kolosov, A.V. Silin, and R.M. Nabut. *Severnnye porty Rossii*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2006.
2. Budin, A.Ya. *Gorodskie i portovye naberezhnye*. SPb.: Izd-vo «Politekhnika», 2014.
3. Garibin, P.A., and N.D. Belyaev. *Vodnye puti i porty. Putevye raboty*. SPb.: Izd-vo SPbPU Petra Velikogo, 2014.
4. Smirnov, G.N., V.V. Aristarkhov, and S.N. Levachev. *Porty i portovye sooruzheniya*. M.: Izd-vo ASV, 2003.
5. Florin, V.A., and P.L. Ivanov. “Liquefaction of Saturated Sandy Soils.” *Proceeding of the Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1. Paris, 1961. 182–186.
6. Ivanov, P.L. *Uplotnenie nesvyaznykh gruntov vzryvami*. M.: Nedra, 1983.
7. Seed, H.B., and I.M. Idriss. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Monograph*. USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
8. Idriss, I.M., and R.W. Boulanger. *Soil liquefaction during earthquakes*. USA, California: EERI, 2008.
9. Boulanger, R.W., M. Khosravi, A. Khosravi, D.W. Wilson, A. Pulido, and W. Yunlong. “Remediation of liquefaction effects for a dam using soil-cement grids: Centrifuge and numerical modeling.” *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul, Korea, 2017. 2477–2480.
10. Ishihara, K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic. Monograph*. USA, Oxford: Clarendon Press, 2006.
11. Towhata, Ikuo, Shigeru Goto, Yuichi Taguchi, Toshihiko Hayashida, Yuki Shintaku, and Yuki Hamada. “On ageing of liquefaction resistance of sand.” *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2.21* (2015): 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Kokusho, T. “Energy-based liquefaction potential compared with stress-based evaluation.” *Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015*. IIT Madras, Chennai, India, 2015. 9–18.
13. Minaev, O.P. “Development of dynamic methods for deep compaction of slightly cohesive bed soils.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 6 (2013): 21–23.
14. Zubkov, V.M., E.D. Kovalevskii, and V.M. Anisimov. “Sposob glubinnogo uplotneniya peschanykh osnovanii.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 2 (1983): 6–7.
15. Savinov, O.A., and A.Ya. Luskin. *Vibratsionnyi metod pogruzheniya svai i ego primeneniye v stroitel'stve*. L.; M.: Gosstroizdat, 1960.
16. Tseitlin, M.G., V.V. Verstov, and G.G. Azbel'. *Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologiya v svainykh i burovnykh rabotakh*. L.: Stroiizdat, 1987.
17. Minaev, O.P. “Razvitie vibrometoda uplotneniya gruntov v stroitel'stve.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 4 (2011): 39–42.
18. Minaev, O.P., Yu.K. Sevenard, E.M. Perlei, and A.I. Sosnin. RU 2 135 690 C1, IPC E 02 D 3/054. Sposob glubinnogo vibrouplotneniya peschanykh gruntov. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Aug. 1999.
19. Minaev, Oleg P. “Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures.” *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2.80* (2016): 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11
20. Chelomei, V.N. ed. *Vibratsiya v tekhnike: sprav.* Vol. 4. M.: Mashinostroenie, 1978 – 1981.

21. Blekhman, I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika*. SPb.: Izdatel'skii Dom «Ruda i metally», 2013.
22. Stavnitsker, L.R. *Ceismostoikost' osnovanii i fundamentov: monografiya*. M: Izda-tel'stvo Assotsiatsii Stroitel'nykh vuzov, 2010.
23. Grabe, J., E. Heins, and T. Hamann. "Simulation of ground improvement using deep vibration compaction." *Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015*. IIT Madras, Chennai, India, 2015. 281–284.
24. Radchenko, G.A. "Uplotnenie peskov Asuanskoi plotiny glubinnymi vibratorami." *Tr. LPI*. L.: Leningradskii politekhnicheskii in-t, 1959: 12–21.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Минаев Олег Петрович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [minaev.op@bk.ru](mailto:minaev.op@bk.ru),  
[kaf\\_port@gumrf.ru](mailto:kaf_port@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Minaev, Oleg P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [minaev.op@bk.ru](mailto:minaev.op@bk.ru),  
[kaf\\_port@gumrf.ru](mailto:kaf_port@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.  
Received: January 15, 2018.

## THE STRESS DEFORMED STATE OF MARINE PORT STRUCTURES WITH SUPPORT WALL AS FUNDAMENTAL PLATE

**T. T. Sultanov, G. M. Tlepiyeva, Sh. Sh. Sattarova**

Eurasian National University named after L.N. Gumilev,  
Astana, Republic of Kazakhstan

*Modern spatial structures in the process are subject to various force effects, so their components are in a difficult stress-strain state and the individual components pass into the stage of plastic deformation, which significantly affects the accuracy of calculations. Definition of kinematic and power factors in each node element structures depending on the mechanical and geometrical characteristics of the materials and the quantities and types of external forces, for the purpose of optimal parameters destination constructions is problematic task of structural mechanics and elasticity. The dimensional structures under consideration are divided into final elements that interact with each other at the nodes. All nodes are numbered with indication of the beginning and end of each final element. The design refers to the global coordinate system OXYZ, where the global coordinate system coincides with the coordinate system of the ground solid. A small-layered base with rigidly coupled inclined layers near the structure is modeled by an elastic anisotropic body with an isotropic plane inclined to the horizon at an arbitrary angle and coinciding with the bedding plane of the layers. The equations of the generalized Hooke's law with respect to the Cartesian coordinate system OXYZ are derived, the OZ-axis is directed vertically upward, the axes OX and OY-horizontally. Defined deformation coefficients and modules of elasticity as a function of the elastic constants and the five angles of inclination of the plane of isotropy and structural axes of the line deflection stretch plane of isotropy.*

*Keywords: seaport, retaining wall, foundation plate, anisotropic base.*

### For citation:

Sultanov, Timur T., Gulnar M. Tlepiyeva, and Sholpan Sh. Sattarova. "The stress deformed state of marine port structures with support wall as fundamental plate." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

**УДК 624.137.4**

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОГО ПОРТА «ПОДПОРНАЯ СТЕНКА — ФУНДАМЕНТНАЯ ПЛИТА — АНИЗОТРОПНОЕ ОСНОВАНИЕ»

**Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева, Ш. Ш. Саттарова**

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,  
Астана, Республика Казахстан

*Современные пространственные сооружения в процессе работы подвержены различным силовым воздействиям, поэтому их конструктивные элементы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии и отдельные узлы переходят в стадию пластического деформирования, что оказывает существенное влияние на точность расчетов. Определение кинематических и силовых факторов в каждом узловом элементе сооружений в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик материалов, а также от величин и вида внешних усилий с целью назначения оптимальных параметров конструкций является проблемной задачей строительной механики и теории упругости. Рассматриваемые пространственные конструкции разбиваются на конечные элементы, взаимодействующие между собой в узлах. Все узлы нумеруются с указанием начала и конца каждого конечного элемента. Конструкция относится к глобальной системе координат OXYZ, причем глобальная система координат совпадает с системой координат грунтового массива. Мелкослоистое основание с жесткосцепленными наклонными слоями вблизи сооружения моделируется упругим анизотропным телом с плоскостью изотропии, наклоненной*



*к горизонту под произвольным углом и совпадающей с плоскостью напластования слоев. Выводятся уравнения обобщенного закона Гука относительно декартовой системы координат OXYZ, ось OZ направлена вертикально вверх, оси OX и OY — горизонтально. Определяются коэффициенты деформации и модули упругости в виде функций от пяти упругих постоянных и углов наклона плоскости изотропии и отклонения оси конструкции от линии простираения плоскости изотропии.*

*Ключевые слова: морской порт, подпорная стенка, фундаментная плита, анизотропное основание.*

**Для цитирования:**

Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние конструкций морского порта «подпорная стенка — фундаментная плита — анизотропное основание» / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева, Ш. Ш. Саттарова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

### **Введение (Introduction)**

Для осуществления взаимодействия между сооружениями и грунтовым основанием проектируются единые по назначению, но многообразные по конструкции, методам расчета и технологии изготовления фундаментные конструкции. Стоимость оснований и фундаментов современных промышленных и гражданских зданий составляет 10 – 12 % стоимости всего сооружения. Для плотин, шлюзов, мостовых устоев, подпорных стен морского порта, башен и резервуаров она достигает 40 – 60 % общей стоимости [1]. На устройство фундаментов расходуется до 25 % трудовых затрат и до 40 % рабочего времени [2]. Большой проблемой является также обеспечение устойчивости морских буровых платформ с учетом особенности грунтового основания [3].

Наряду со знанием напряженно-деформированного состояния конструкций и фундаментов чрезвычайно важным является изучение грунтов, составляющих морское дно, свойства которых входят в расчетные параметры задач. При этом особенно важно определить прочность грунтового основания на сдвиг по поверхности дна, глубинный сдвиг и разрушение давлением. Достоверность данных повысится, если учесть анизотропные деформационные, прочностные и реологические свойства грунтового основания, ориентацию плоскостей изотропии относительно поверхности дна и распределение анизотропных напряжений в местах опирания сооружения на морское дно. Известны случаи опрокидывания одного из глубоководных сооружений на Каспии из-за потери прочности горных пород основания вблизи опоры морской буровой платформы [4].

Многообразие свойств грунтовых оснований, зависящее не только от условий их естественного залегания, но и от напряженного состояния, влажности и температуры и т. д., конечно, нельзя описать достаточно полно и детально с помощью конструкций простых схем, поэтому возникает задача создания расчетных моделей основания, не противоречащих позиции механики грунтов, строительной механики и теории упругости. Изучение схемы работы основания в результате создания и анализа различных конкурирующих моделей, выбор и обоснование расчетной модели основания является весьма ответственной частью расчета, поэтому теория расчета конструкций и фундаментов на упругом основании приобретает все большее значение. Уточнение расчетных методов и моделей основания приводит к более экономичным решениям и, следовательно, к уменьшению трудозатрат и материалов на возведение конструкций. Кроме того, разработка более простых методов расчета позволит уменьшить сроки проектирования этих конструкций и, таким образом, снизить удельный вес проектных работ. Практикой продиктована необходимость дальнейшего поиска путей создания на базе разрозненных методов расчета и отдельных расчетных предположений единого методологически действенного инструмента исследования основных аспектов геомеханического поведения основания в зоне его взаимодействия с различными морскими сооружениями.

Таким образом, в связи с вышеизложенными обстоятельствами остаются актуальными вопросы дальнейшего изучения взаимодействия конструкций и фундаментов морских сооружений с грунтовым основанием с учетом анизотропных и реологических свойств и других особенностей

последнего. Разработка и обоснование такой методологии расчета представляет собой решение крупной научной проблемы, имеющей важное значение.

### Теоретическая основа метода исследования (The theoretical basis of the research method)

Рассмотрим расчетную схему системы «подпорная стена – фундаментная плита – анизотропное основание» с действующими вертикальными постоянными усилиями по продольной оси протяженной плиты (рис. 1). Предполагается, что стена и фундаментная плита жестко и непрерывно сцеплены по всей контактной поверхности с упругим основанием. Изучается напряженное и деформированное состояние сложной анизотропной системы от действия вертикальных усилий на поверхность фундаментной плиты. Вычисления выполнены методом конечных элементов с привлечением плоских восьмиузловых изопараметрических расчетных элементов. Для этого рассматривается плоскость поперечного сечения изучаемого объекта, которая моделируется невесомым анизотропным полем, находящимся в условиях обобщенной плоской деформации при следующих граничных условиях:

– на верхней негладкой границе  $l$  действуют нормальные усилия:

$$\sigma_z = P(x), \quad \tau_{yz} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = 0; \quad (1)$$

– подпорная стена и фундаментная плита жестко и непрерывно сцеплены с анизотропным основанием:

$$\sigma_n^n = \sigma_n, \quad \tau_{yz}^B = \tau_{yz}, \quad \tau_{xz}^n = \tau_{xz}, \quad \tau_{xy}^n = \tau_{xy}, \quad u^n = u, \quad w^n = w, \quad v^n = v; \quad (2)$$

– боковые границы  $AE$  и  $DF$  и нижняя граница  $EF$  от действия вертикальных усилий  $P(x)$  на плите не деформируются:

$$u = w = v = 0 \quad \text{при} \quad -\infty < E < \infty, \quad -H \leq z \leq H. \quad (3)$$

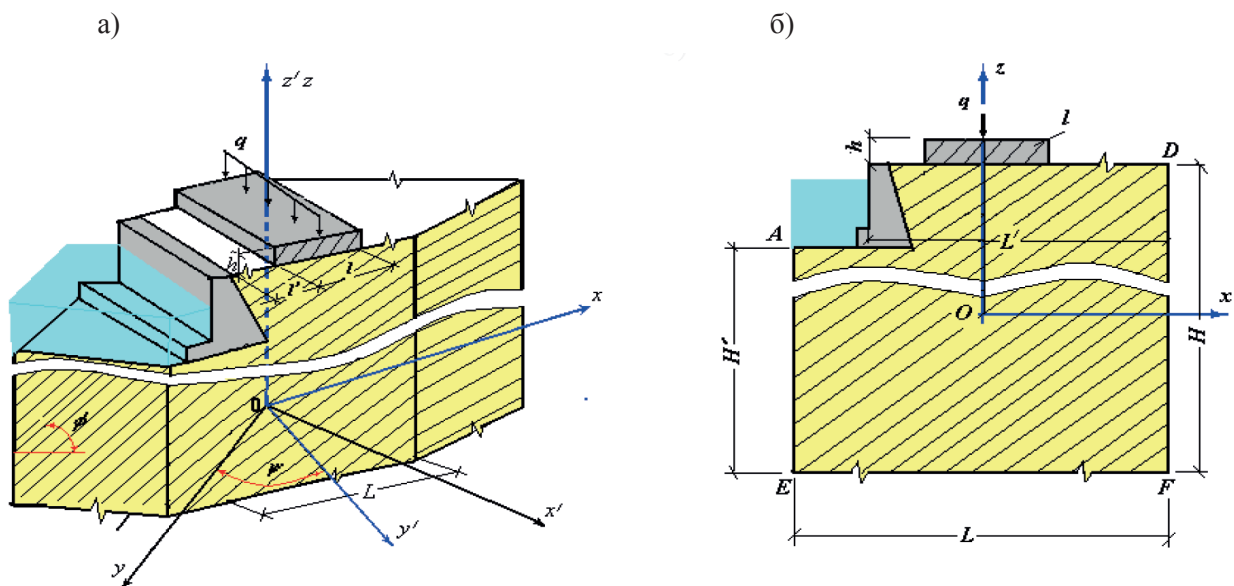


Рис. 1. Расчетная схема упругой системы  
«подпорная стена — фундаментная плита — анизотропное основание»:  
а — общий вид системы; б — расчетная плоскость поперечного сечения

В соответствии с методом конечных элементов [5] расчетная область размерами  $80,0 \times 40,30$  м с подпорной стеной и фундаментной плитой разбивается с помощью 735 узлов на 224 восьмиузловых изопараметрических элемента.

Не нарушая общности постановки задач, в качестве упругих постоянных для материалов подпорной стены и фундаментной плиты взяты соответствующие характеристики, близкие для изотропного тела, т. е.

$$E_k^n = E, \nu_k^n = \nu \text{ и } G_2^n = G^n = E_1^n / 2(1 + \nu_1^n) \quad (k = 1, 2). \quad (4)$$

Углы наклона плоскости изотропии  $\varphi$  и отклонения продольной оси подпорной стены и фундаментной плиты  $\psi^{\text{пс}} = \psi^{\text{пл}}$  от линии простираения плоскости изотропии основания изменяются от нуля до  $\pi$  со следующими шагами:  $\Delta\varphi = \pi/6$  и  $\Delta\psi = \pi/6$ . При дискретизации подобласть поперечного сечения подпорной стены и фундаментной плиты разбита на 20 и 12 изопараметрических элементов соответственно.

Заданы следующие граничные условия: боковые стороны и основания недеформируемы, т. е. в них проекции перемещений  $u = v = w = 0$ , нижняя и правая боковая границы подпорной стены, а также нижняя граница плиты жестко и непрерывно сцеплены, т. е. выполняется условие жесткого контакта. На верхней границе фундаментной плиты в общем случае действуют вертикальные постоянные нагрузки  $P(x)$ , зависящие от координаты  $x$ , и они обычным образом приводятся к узлам; остальная часть верхней и боковой границы области свободна от действия напряжений.

### Результаты (Results)

Для проверки правильности действия разработанного алгоритма и составленной программы по расчету упругого напряженного и деформированного состояния системы предварительно решен ряд тестовых задач изотропной полуплоскости с упругими характеристиками:  $E = 1 \times 10^6$  МПа,  $\nu = 0,2$ , находящейся под действием вертикальной сосредоточенной нагрузки  $P$  на верхней границе, т. е. в точке  $O$  (рис. 2).

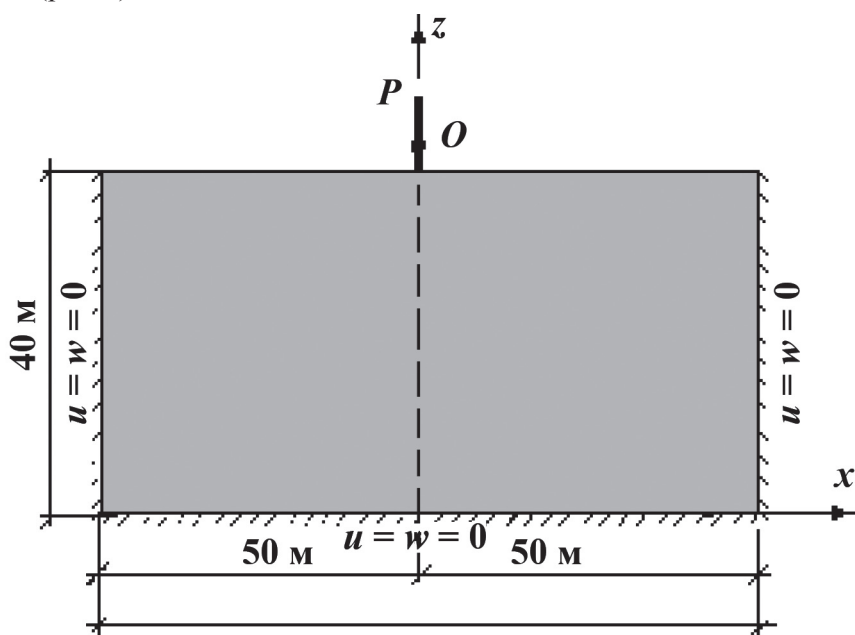


Рис. 2. Изотропная полуплоскость под действием вертикальной нагрузки  $P$

Размеры расчетной области: высота 40 м, длина по основанию 100 м, и граничные условия задач показаны на рис. 2, они выбраны таким образом, чтобы исключить влияние граничных условий. Расчетная область разбита на 208 конечных элемента с помощью 685 узлов со сгущением сетки разбивки в подобласти наземного сооружения и вблизи нее. Система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса. Результаты расчетов для тяжелой полуплоскости с удельным весом  $2,5 \text{ т/м}^3$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение значений напряжений  $\sigma$   
в разных точках изотропной полуплоскости от действия собственного веса**

|                                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Глубина<br>$H - h = z$ , м                  | 0,06 | 0,09 | 0,22 | 0,41 | 0,64 | 0,93 | 1,26 | 1,64 | 2,01 |
| $\sigma_z / \gamma H$ (аналитический метод) | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 0,23 | 0,31 | 0,41 | 0,52 |
| $\sigma_z$ (метод конечных элементов)       | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,11 | 0,16 | 0,23 | 0,31 | 0,41 | 0,52 |

Решена также статическая задача для полуплоскости с фундаментной плитой размерами  $1,0 \times 0,4$  м, находящейся под действием единичной вертикальной нагрузки  $P$  при аналогичных физико-механических свойствах материала для плиты и полуплоскости. В табл. 2 приведены значения напряжений  $\sigma$  в разных точках полуплоскости с плитой. Сравнительный анализ полученных результатов по МКЭ и аналитическим методом показывает их удовлетворительную сходимость.

Таблица 2

**Сравнение значений напряжений  $\sigma_z$**

|                                                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Глубина<br>$H - h = z$ , м                           | 0,06 | 0,12 | 0,24 | 0,46 | 0,68 | 1,02 | 1,24 | 1,36 | 1,81 | 2,25 | 2,81 | 3,36 |
| $\sigma_z, \pi z / 2P$<br>(аналитический метод)      | 0,99 | 0,54 | 0,27 | 0,14 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| $\sigma_z, \pi z / 2P$<br>(метод конечных элементов) | 0,99 | 0,55 | 0,29 | 0,16 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |

Таким образом, сравнительный анализ полученных результатов тестовых задач показывает достоверность разработанных алгоритмов и составленных пакетов прикладных программ.

В табл. 3 приведены значения параметров, необходимых для дальнейших расчетов.

Таблица 3

**Физико-механические характеристики основания  
и материала фундаментной плиты и подпорной стены**

| Тип | Наименование типов     | Физико-механические характеристики |                       |                       |         |         |                                | Наименование материалов |
|-----|------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|--------------------------------|-------------------------|
|     |                        | $E_1$ ,<br>$10^4$ МПа              | $E_2$ ,<br>$10^4$ МПа | $G_2$ ,<br>$10^4$ МПа | $\nu_1$ | $\nu_2$ | $\gamma$ ,<br>т/м <sup>3</sup> |                         |
| 1   | Основание [6]          | 1,074                              | 0,523                 | 0,12                  | 0,413   | 0,198   | 2,6                            | Алевролит               |
| 2   | Основание [6]          | 1,074                              | 0,523                 | 0,20                  | 0,29    | 0,125   | 2,7                            | Известняк               |
| 3   | Фундаментная плита [7] | 2,5                                | 2,5                   | G                     | 0,3     | 0,3     | 2,8                            | Железобетон             |
| 4   | Штамп [8]              | 50,0                               | 50,0                  | G                     | 0,3     | 0,3     | 2,8                            | Железобетон             |
| 5   | Подпорная стена [9]    | 2,5                                | 2,5                   | G                     | 0,3     | 0,3     | 2,8                            | Железобетон             |

На рис. 3 и 4 показаны эпюры упругих перемещений, в табл. 4 приведены значения упругих перемещений  $w$  и  $u$  на границе изучаемых объектов при плоской ( $\psi = 0$ ) и обобщенной плоской деформации ( $\psi \neq 0$ ). Видно, что величина угла падения плоскости изотропии оказывает существенное влияние на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости изотропии  $\varphi$  вертикальные перемещения на краях плиты значительно уменьшаются. При любом угле падения плоскости изотропии анизотропного основания величина перемещения значительно больше (почти в три раза при  $\varphi = \psi = 0$ ), чем при соответствующих перемещениях в изотропном упругом основании (см. рис. 3 пунктирные линии).

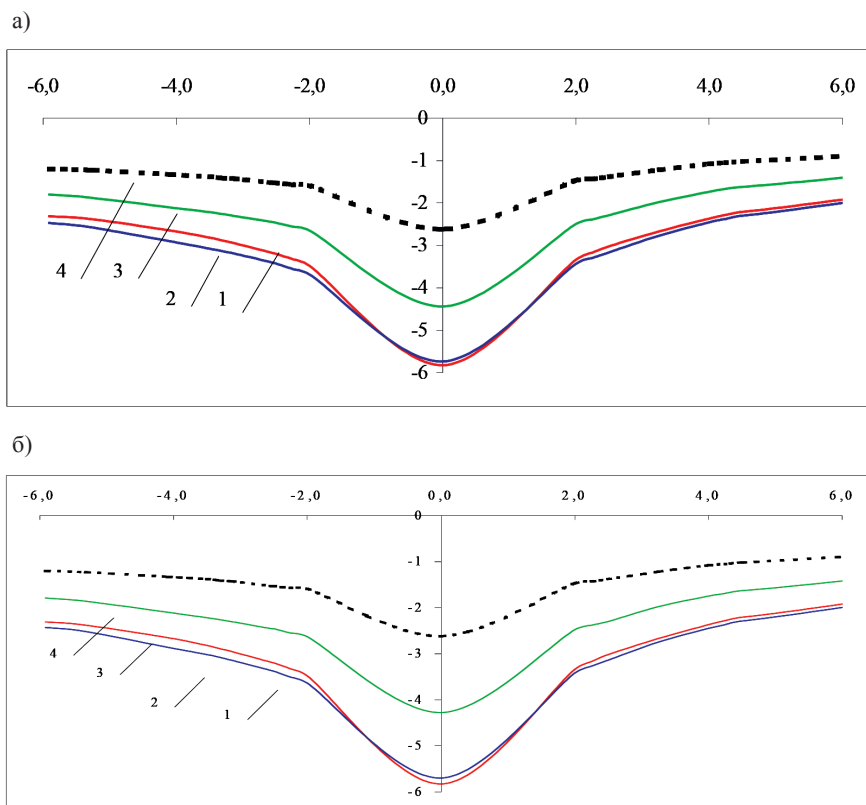


Рис. 3. Эпюры упругих перемещений  $w$  ( $10^4 / Pl$ ) на левой границе подпорной стены:  
а — при угле  $\psi = 0^\circ$ ; б — при угле  $\psi = 30^\circ$   
Условные обозначения: 1 —  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 —  $\varphi = 30^\circ$ ; 3 —  $\varphi = 60^\circ$ ; 4 — изотропный случай

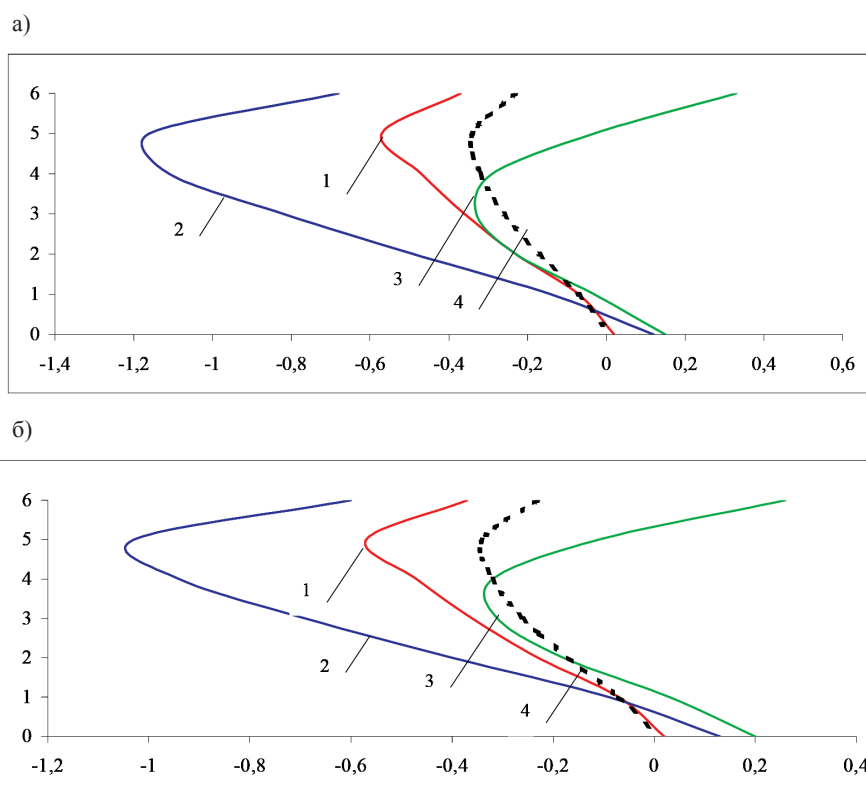


Рис. 4. Эпюры горизонтальных упругих перемещений  $u$  ( $10^4 / Pl$ ) на левой границе подпорной стены:  
а — при угле  $\psi = 0^\circ$ ; б — при угле  $\psi = 30^\circ$   
Условные обозначения: 1 —  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 —  $\varphi = 30^\circ$ ; 3 —  $\varphi = 60^\circ$ ; 4 — изотропный случай



Таблица 4

Значения перемещений  $u$  ( $10^4/P$ ) и  $w$  ( $10^4/P$ ) на границе анизотропной системы  
«подпорная стена – фундаментная плита – основание»

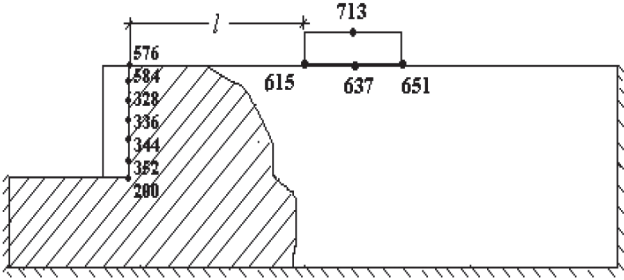
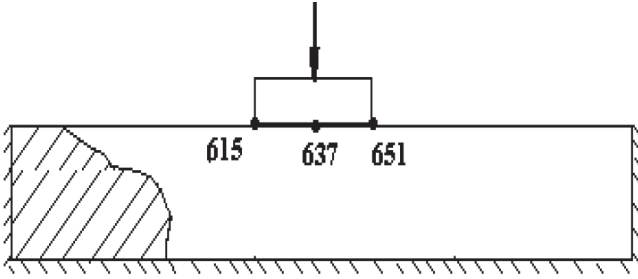
| Номер узла                   |  |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                              | $\psi = 0$                                                                         |                      |                      | $\psi = 30^\circ$    |                      |                      | $\psi = 90^\circ$    |
|                              | $\varphi = 0$                                                                      | $\varphi = 30^\circ$ | $\varphi = 60^\circ$ | $\varphi = 30^\circ$ | $\varphi = 60^\circ$ | $\varphi = 90^\circ$ | $\varphi = 90^\circ$ |
| Перемещения $u$ ( $10^4/P$ ) |                                                                                    |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 576                          | -0,37                                                                              | -0,68                | 0,33                 | -0,60                | 0,26                 | -0,22                | -0,23                |
| 584                          | -0,57                                                                              | -1,16                | -0,03                | -1,03                | -0,11                | -0,38                | -0,34                |
| 328                          | -0,47                                                                              | -1,11                | -0,29                | -0,94                | -0,32                | -0,38                | -0,32                |
| 336                          | -0,36                                                                              | -0,82                | -0,33                | -0,69                | -0,31                | -0,32                | -0,26                |
| 344                          | -0,23                                                                              | -0,49                | -0,23                | -0,40                | -0,18                | -0,22                | -0,17                |
| 352                          | -0,07                                                                              | -0,14                | -0,03                | -0,09                | 0,03                 | -0,11                | -0,07                |
| 200                          | 0,02                                                                               | 0,12                 | 0,15                 | 0,13                 | 0,20                 | -0,04                | 0,01                 |
| Перемещения $w$ ( $10^4/P$ ) |                                                                                    |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
| 576                          | -2,38                                                                              | -2,57                | -1,87                | -2,52                | -1,86                | -1,25                | -1,23                |
| 584                          | -2,34                                                                              | -2,56                | -1,87                | -2,50                | -1,85                | -1,25                | -1,22                |
| 328                          | -2,25                                                                              | -2,41                | -1,86                | -2,36                | -1,83                | -1,21                | -1,18                |
| 336                          | -2,15                                                                              | -2,24                | -1,82                | -2,21                | -1,77                | -1,17                | -1,12                |
| 344                          | -2,05                                                                              | -2,06                | -1,72                | -2,04                | -1,66                | -1,11                | -1,04                |
| 352                          | -1,95                                                                              | -1,90                | -1,60                | -1,89                | -1,53                | -1,04                | -0,95                |
| 200                          | -1,91                                                                              | -1,82                | -1,53                | -1,81                | -1,46                | -1,01                | -0,88                |

Таблица 5

Значения нормальных  $\sigma/P$  и касательных  $\tau/P$  напряжений  
на границе анизотропной системы «фундаментная плита – основание»

| Углы наклона плоскости изотропии и отклонения |           |  |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                               |           | 615                                                                                  |            | 637        |            | 651        |            |
| $\psi$                                        | $\varphi$ | $\sigma_x$                                                                           | $\sigma_z$ | $\sigma_x$ | $\sigma_z$ | $\sigma_x$ | $\sigma_z$ |
| 0                                             | 0         | -0,475                                                                               | -0,700     | -0,143     | -0,446     | -0,168     | -0,469     |
| Значения нормальных напряжений $\sigma/P$     |           |                                                                                      |            |            |            |            |            |

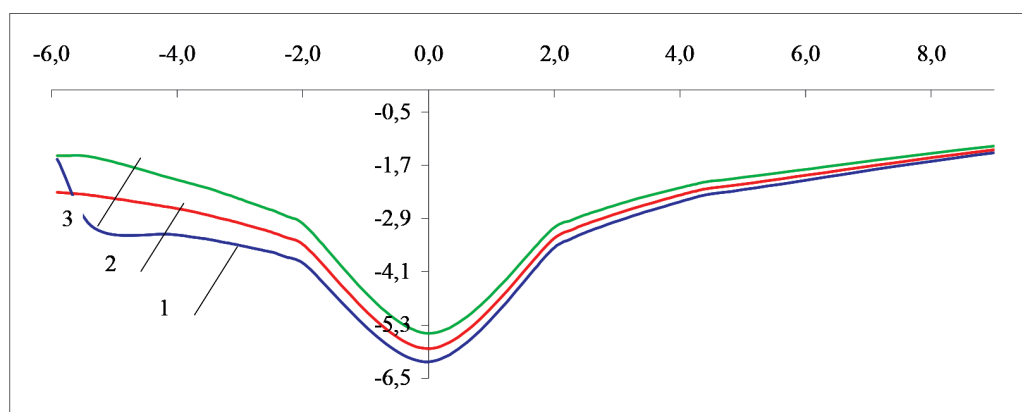
|                                          |        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|------------------------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 30°                                      | 0°     | –0,525      | –0,748      | –0,236      | –0,379      | –0,424      | –0,727      |             |             |             |
|                                          | 30°    | –0,521      | –0,743      | –0,226      | –0,387      | –0,407      | –0,725      |             |             |             |
|                                          | 45°    | –0,521      | –0,736      | –0,216      | –0,398      | –0,405      | –0,720      |             |             |             |
|                                          | 60°    | –0,519      | –0,725      | –0,206      | –0,413      | –0,422      | –0,714      |             |             |             |
|                                          | 90°    | –0,485      | –0,702      | –0,193      | –0,430      | –0,492      | –0,713      |             |             |             |
| 45°                                      | 0°     | –0,432      | –0,727      | –0,202      | –0,349      | –0,551      | –0,787      |             |             |             |
|                                          | 30°    | –0,440      | –0,727      | –0,201      | –0,363      | –0,504      | –0,772      |             |             |             |
|                                          | 45°    | –0,456      | –0,725      | –0,201      | –0,378      | –0,468      | –0,754      |             |             |             |
|                                          | 60°    | –0,471      | –0,721      | –0,199      | –0,395      | –0,454      | –0,736      |             |             |             |
|                                          | 90°    | –0,468      | –0,706      | –0,194      | –0,416      | –0,475      | –0,718      |             |             |             |
| 60°                                      | 0°     | –0,285      | –0,700      | –0,177      | –0,362      | –0,533      | –0,853      |             |             |             |
|                                          | 30°    | –0,327      | –0,699      | –0,176      | –0,381      | –0,492      | –0,808      |             |             |             |
|                                          | 45°    | –0,370      | –0,703      | –0,180      | –0,390      | –0,463      | –0,775      |             |             |             |
|                                          | 60°    | –0,409      | –0,708      | –0,185      | –0,398      | –0,449      | –0,749      |             |             |             |
|                                          | 90°    | –0,443      | –0,711      | –0,189      | –0,410      | –0,450      | –0,723      |             |             |             |
| 90°                                      | 0°     | –0,191      | –0,686      | –0,063      | –0,475      | –0,193      | –0,193      |             |             |             |
|                                          | 30°    | –0,227      | –0,710      | –0,090      | –0,437      | –0,230      | –0,722      |             |             |             |
|                                          | 45°    | –0,277      | –0,715      | –0,118      | –0,421      | –0,281      | –0,727      |             |             |             |
|                                          | 60°    | –0,336      | –0,336      | –0,146      | –0,413      | –0,340      | –0,728      |             |             |             |
|                                          | 90°    | –0,399      | –0,713      | –0,173      | –0,410      | –0,405      | –0,726      |             |             |             |
| Значения касательных напряжений $\tau/P$ |        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| $\varphi$                                | $\Psi$ | $\tau_{xz}$ | $\tau_{yz}$ | $\tau_{xy}$ | $\tau_{xz}$ | $\tau_{yz}$ | $\tau_{xy}$ | $\tau_{xz}$ | $\tau_{yz}$ | $\tau_{xy}$ |
| 30°                                      | 0°     | 0,000       | –0,179      | 0,000       | 0,000       | 0,000       | 0,000       | 0,000       | –0,047      | 0,000       |
|                                          | 30°    | 0,000       | –0,158      | 0,000       | 0,000       | –0,010      | 0,000       | 0,000       | 0,231       | 0,000       |
|                                          | 45°    | –0,010      | –0,158      | –0,027      | 0,004       | –0,008      | –0,022      | 0,014       | 0,228       | –0,031      |
|                                          | 60°    | –0,002      | –0,160      | –0,029      | 0,004       | –0,007      | –0,029      | 0,016       | 0,224       | –0,012      |
|                                          | 90°    | 0,001       | –0,166      | –0,034      | 0,004       | –0,005      | –0,027      | 0,017       | 0,218       | 0,019       |
| 45°                                      | 0°     | 0,020       | –0,190      | –0,048      | 0,006       | 0,000       | 0,000       | 0,019       | 0,199       | 0,053       |
|                                          | 30°    | 0,000       | –0,191      | 0,000       | 0,000       | 0,014       | 0,000       | 0,000       | 0,167       | 0,000       |
|                                          | 45°    | –0,010      | –0,176      | –0,001      | 0,002       | 0,005       | –0,018      | –0,007      | 0,181       | –0,049      |
|                                          | 60°    | 0,007       | –0,170      | 0,001       | 0,000       | –0,001      | –0,021      | –0,011      | 0,196       | –0,032      |
|                                          | 90°    | 0,021       | –0,173      | –0,006      | 0,001       | –0,003      | –0,020      | –0,736      | 0,206       | 0,000       |
| 60°                                      | 0°     | 0,014       | –0,194      | –0,027      | 0,007       | 0,000       | 0,000       | 0,014       | 0,203       | 0,032       |
|                                          | 30°    | 0,000       | –0,189      | 0,000       | 0,000       | 0,025       | 0,000       | 0,000       | 0,097       | 0,000       |
|                                          | 45°    | 0,023       | 0,023       | 0,050       | –0,009      | 0,015       | –0,004      | –0,808      | –0,808      | –0,018      |
|                                          | 60°    | 0,038       | –0,173      | 0,054       | –0,005      | 0,007       | –0,001      | –0,051      | 0,161       | –0,004      |
|                                          | 90°    | 0,041       | –0,177      | 0,041       | –0,002      | 0,002       | –0,001      | –0,040      | 0,186       | 0,186       |
| 90°                                      | 0°     | 0,007       | –0,190      | –0,004      | 0,004       | 0,000       | 0,000       | 0,007       | 0,199       | 0,008       |
|                                          | 30°    | 0,000       | –0,133      | 0,000       | 0,000       | 0,000       | 0,000       | 0,000       | 0,138       | 0,000       |
|                                          | 45°    | 0,052       | –0,145      | 0,094       | 0,000       | 0,000       | 0,057       | –0,055      | –0,055      | 0,096       |
|                                          | 60°    | 0,067       | –0,160      | 0,123       | 0,000       | 0,000       | 0,063       | –0,070      | 0,168       | 0,125       |
|                                          | 90°    | –0,346      | –0,336      | –0,336      | 0,000       | 0,000       | 0,053       | –0,059      | 0,181       | 0,181       |

В табл. 5 и 6 и на рис. 5 приведены значения напряжений в точках контактной поверхности. Анализ содержания таблиц показывает влияние на значения напряжений степени упругой анизотропии основания и величины углов  $\varphi$  и  $\psi$ . Рост угла отклонения продольной оси плиты от линии простираения плоскости изотропии  $\psi$  не меняет общего характера распределения перемещений, но степень их асимметрии относительно вертикальной оси  $z$  уменьшается.

В случае, если  $\varphi = \psi = \pi/2$  значения перемещений в анизотропной полуплоскости совпадают со значениями в изотропной полуплоскости. С ростом угла отклонения  $\psi$  при постоянном значении угла падения плоскости изотропии  $\varphi$  величины вертикальных перемещений  $w$  уменьшаются.

С увеличением жесткости упругой плиты (рис. 5) и угла наклона плоскости изотропии  $\varphi$  на границе контакта системы величины вертикальных перемещений  $w$  уменьшаются и наблюдается асимметрия, которая сохраняется и при увеличении угла  $\psi$ . С уменьшением деформативности материала плиты наибольшие перемещения наблюдаются в середине, такая тенденция в характере их распределения наблюдается при любых значениях углов  $\varphi$  и  $\psi$ . Жесткостные характеристики материала фундаментной плиты сказываются на упругом напряженном состоянии анизотропного основания.

а)



б)

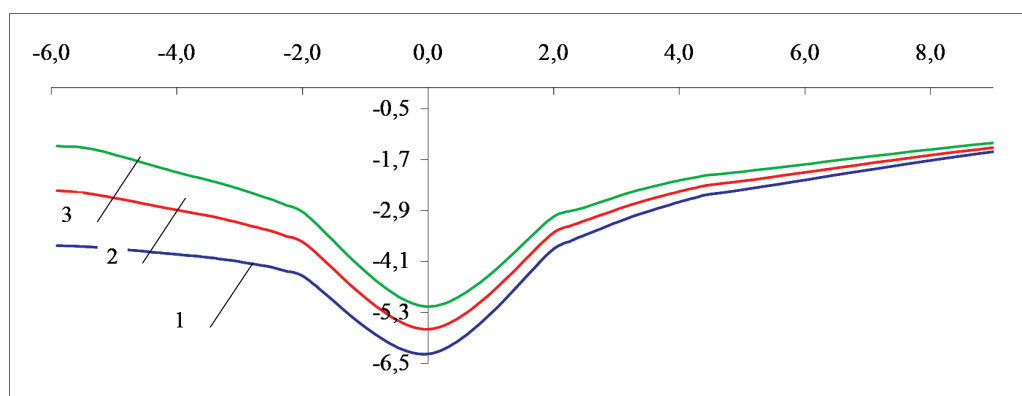


Рис. 5. Эпюры вертикальных упругих перемещений  $w(10^4/P l)$  подпорной стены:

а — при углах  $\psi = 0$ ,  $\varphi = 0$ ; б — при углах  $\psi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$

Условные обозначения: 1 — гибкая фундаментная плита;

2 — упругая фундаментная плита; 3 — штамп

Расстояние между плитой и подпорной стеной оказывает существенное влияние на осадку фундамента, что подтверждает проведенный численный эксперимент. На рис. 6 показано взаимовлияние плиты и подпорной стенки: при уменьшении расстояния до 8 м наблюдается увеличение осадки фундаментной плиты в сторону подпорной стены.

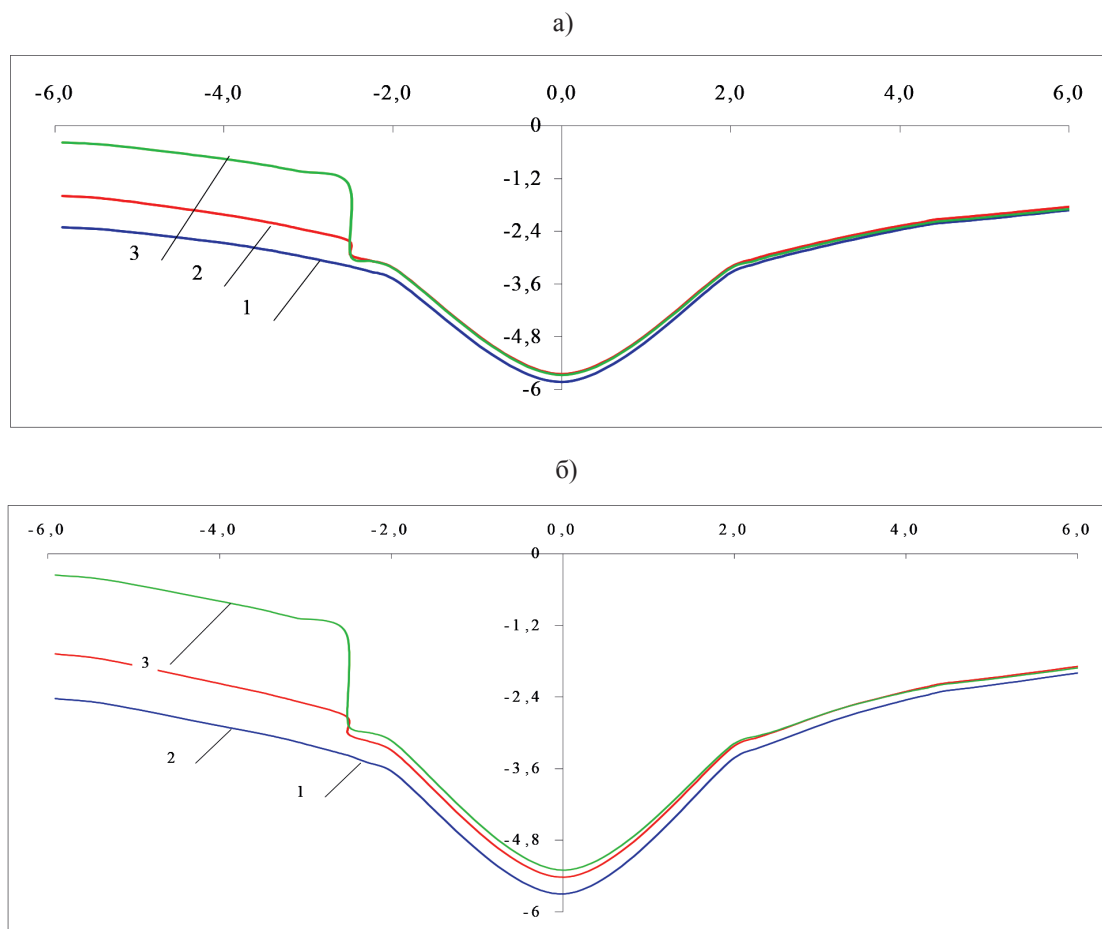
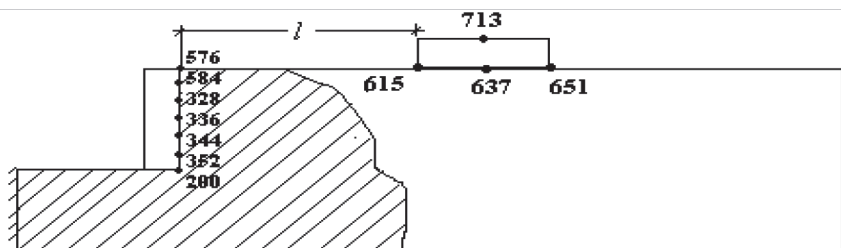


Рис. 6. Эпюры вертикальных упругих перемещений  $w$  ( $10^4/Pl$ ) на границе анизотропной системы «подпорная стена — фундаментная плита — основание»:  
а — при углах  $\psi = 0$ ,  $\varphi = 0$ ; б — при углах  $\psi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$   
Условные обозначения: 1 —  $l = 1,0$  м; 2 —  $l = 3,5$  м; 3 —  $l = 9,0$  м  
( $l$  — расстояние от фундаментной плиты до подпорной стены)

Таблица 6

Значения напряжений  $\sigma_z / P$  на границе анизотропной системы  
«подпорная стена – фундаментная плита – основание»

| Номер узла |  |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|            | $\psi = 0$                                                                           |                      |                      | $\psi = 30^\circ$    |                      |                      | $\psi = 90^\circ$    |
|            | $\varphi = 0$                                                                        | $\varphi = 30^\circ$ | $\varphi = 60^\circ$ | $\varphi = 30^\circ$ | $\varphi = 60^\circ$ | $\varphi = 90^\circ$ | $\varphi = 90^\circ$ |
| 576        | 0,00                                                                                 | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |
| 584        | -0,01                                                                                | -0,01                | 0,00                 | -0,01                | 0,00                 | 0,00                 | 0,00                 |
| 328        | -0,03                                                                                | -0,05                | -0,01                | -0,05                | -0,02                | -0,01                | -0,02                |
| 336        | -0,03                                                                                | -0,05                | -0,03                | -0,05                | -0,03                | -0,02                | -0,03                |
| 344        | -0,04                                                                                | -0,05                | -0,04                | -0,05                | -0,04                | -0,02                | -0,03                |
| 352        | -0,03                                                                                | -0,05                | -0,04                | -0,04                | -0,04                | -0,02                | -0,04                |
| 200        | -0,01                                                                                | -0,02                | -0,02                | -0,02                | -0,02                | -0,01                | -0,02                |

### Обсуждение (Discussion)

Анализ напряженно-деформированного состояния наземных и подземных сооружений указывает на преимущественное применение однородной изотропной модели массива, которая, адекватно отражая реальные свойства массива в целом, в осредненном смысле не позволяет в расчетных схемах отражать такие существенные характеристики породной толщи, как складчатость, слоистость, трещиноватость и самое главное — разную ориентацию продольных осей протяженных (бесконечных) сооружений по отношению к поверхности напластования слоев. В зависимости от ориентации продольных осей бесконечные и полубесконечные полосы, плиты и конструкции причалов морского порта находятся в разных условиях деформации. Например, если продольная ось бесконечных полос совпадает с направлением линии простирания слоев, то можно его рассматривать как плоское деформированное состояние, в случае нормального их пересечения — как обобщенную плоскую деформацию при диагональном простирании оси полосы, занимающем промежуточное положение между первым и вторым случаями.

В существующих работах расчетные схемы разноориентированных продольных осей конструкций по отношению к линии простирания слоев принимаются одинаковыми (не учитываются), хотя, как отмечалось ранее, они находятся в принципиально разных условиях деформации.

Реальный массив и слагающие его породы обладают в целом рядом физических свойств и структурно-механических особенностей. Причем эти свойства и особенности многообразны до бесконечности и, как правило, очень слабо детерминированы. Отмеченным, очевидно, и объясняется модельный подход, широко используемый при рассмотрении напряженно-деформированного состояния массива и решении практических контактных задач.

Рассматривая возможный выбор модели, не следует выпускать из поля зрения двойственный характер предъявляемых к ней основных требований. С одной стороны, модель должна наиболее адекватно отражать реальные свойства массива и охватывать широкий круг встречающихся породных явлений, т. е. расчетные положения на базе принятой модели должны отражаться практической достоверностью и известной универсальностью. С другой стороны, модель массива должна позволять при построении и реализации расчетных положений получать в удобном виде конкретные практические результаты [10].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- экспериментальные исследования физико-механических характеристик и упругих, реологических свойств горных пород морского шельфа и Прикаспийского региона;
- создание физико-механической модели упругого анизотропного наклонно-слоистого основания;
- определение методов решения поставленной задачи, его обоснование, апробирование и определение границ применимости, внедрение результатов;
- приложение разработанной методологии к оценке напряженно-деформированного состояния конструкций морского порта, морских буровых платформ и других гидротехнических сооружений.

Современный этап развития механики грунтов характеризуется активным переходом к новым расчетным моделям, отражающим с максимальной полнотой разнообразные реальные свойства грунтов и горных пород. Основной проблемой механики анизотропных грунтов и горных пород остается построение математической модели, адекватно описывающей процессы их деформирования и разрушения.

### Выводы (Summary)

1. Рассмотрена статическая задача об упругом напряженном и деформированном состоянии анизотропных систем «подпорная стена – фундаментная плита – основание» от действий постоянных вертикальных нагрузок по продольной длине плиты в условиях обобщенной плоской деформации.



2. С целью установления размеров расчетной области, количества расчетных элементов и проверки достоверности составленных программ решены тестовые задачи и выполнено сравнение значений напряжения  $\sigma_z$  изотропной полуплоскости при действии вертикальной сосредоточенной силы  $P$  и собственного веса, определенных аналитическим методом и методом конечных элементов.

3. Разработан алгоритм и пакет прикладных программ, на основе которых в результате многовариантных расчетов выявлены закономерности распределения перемещений и напряжений в упругой анизотропной системе «подпорная стена – фундаментная плита – основание» в условиях обобщенной плоской деформации, исследовано влияние угла наклона плоскости изотропии относительно горизонтальной оси и угла отклонения продольной оси сооружения от линии проектирования слоев основания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты / М. В. Берлинов. — Лань, 2011. — 320 с.
2. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты / Г. Г. Болдырев. — Пенза: ПГУАС, 2009. — 412 с.
3. Мори В. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / В. Мори, Д. Фурментро. — М.: Мир, 1994. — 416 с.
4. Айталиев Ш. М. Проблемы устойчивого функционирования инженерных сооружений на шельфе Казахского шельфа Каспия / Ш. М. Айталиев, Ж. К. Масанов, Е. Т. Божанов, И. Н. Дюсембаев // III Ассамблея Ассоциации университетов Прикаспийских государств: тез. докл. — Актау: Казахстан, 1998. — С. 45–49.
5. Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи / С. И. Трушин. — М.: Изд-во АСВ, 2008. — 256 с.
6. Davenport A. G. Gust loading factors / A. G. Davenport // Journal of the Structural Division. — 1967. — Vol. 93. — Is. 3. — Pp. 11–34.
7. Барнштейн М. Ф. Расчет пространственных глубоководных сооружений на волновые, ветровые и сейсмические воздействия / М. Ф. Барнштейн // Строительная механика и расчет сооружений. — 1982. — № 1. — С. 47–54.
8. Халфин И. Ш. Морские нефтепромысловые гидротехнические сооружения и волновые воздействия на них / И. Ш. Халфин. — М.: Судостроение, 1979.
9. Масанов Ж. К. Об одном алгоритме построения матрицы жесткости системы метода конечных элементов для трехмерной теории упругости / Ж. К. Масанов, И. Б. Баймаханов // Известия АН Каз. ССР. Серия физико-математических наук. — 1977. — № 3. — С. 24–31.
10. Suleimenov T. Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards / T. Suleimenov, T. Sultanov, G. Tlepiyeva, Y. Sovet // New Trends in Process Control and Production Management. — London, UK: Taylor & Francis Group, 2018. — Pp. 497–507.

## REFERENCES

1. Berlinov, M.V. *Osnovaniya i fundamenty*. Lan', 2011.
2. Boldyrev, G.G. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty*. Penza: PGUAS, 2009.
3. Mori, V., and D. Furmentro. *Mekhanika gornyykh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefi*. M.: Mir, 1994.
4. Aitaliev, Sh.M., Zh.K. Masanov, E.T. Bozhanov, and I.N. Dyusembaev. "Problemy ustoichivogo funkcionirovaniya inzhenernykh sooruzhenii na shel'fe Kazakhstanskogo shel'fa Kaspiya." *III Assambleya Assotsiatsii universitetov Prikaspiiskikh gosudarstv: Tezisy dokl.* Aktau: Kazakhstan, 1998: 45–49.
5. Trushin, S.I. *Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachi*. Moskva: Izd-vo ASV, 2008.
6. Davenport, Alan G. "Gust loading factors." *Journal of the Structural Division* 93.3 (1967): 11–34.
7. Barnshtein, M.F. "Raschet prostranstvennykh glubokovodnykh sooruzhenii na volnovye, vetrovye i seismicheskie vozddeistviya." *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* 1 (1982): 47–54.
8. Khalfin, I.Sh. *Morskie neftepromyslovye gidrotekhnicheskie sooruzheniya i volnovye vozddeistviya na nikh*. M.: «Sudostroenie», 1979.

9. Masanov, Zh.K., and I.B. Baimakhanov. "Ob odnom algoritme postroeniya matritsy zhestkosti sistemy metoda konechnykh elementov dlya trekhmernoi teorii uprugosti." *Izvestiya AN Kaz.SSR. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* 3 (1977): 24–31.

10. Suleimenov, T., T. Sultanov, G. Tlepiyeva, and Y. Sovet. "Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards." *New Trends in Process Control and Production Management*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2018: 497–507.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Султанов Тимур Тулеугалиевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилева  
010000, Республика Казахстан, Астана,  
ул. Сатпаева, 3  
e-mail: [runit78@mail.ru](mailto:runit78@mail.ru)

**Тлепиева Гульнар Муратовна** —  
кандидат технических наук, доцент  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилева  
010000, Республика Казахстан, Астана, ул.  
Сатпаева, 3  
e-mail: [tlepiyevagm@yandex.ru](mailto:tlepiyevagm@yandex.ru)

**Саттарова Шолпан Шайзадовна** —  
преподаватель  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилева  
010000, Республика Казахстан, Астана, ул.  
Сатпаева, 3  
e-mail: [sholpan\\_09.94@mail.ru](mailto:sholpan_09.94@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sultanov, Timur T.** —  
PhD, associate professor  
Eurasian National University named  
after L.N. Gumilev  
3 Satpaev Str., Astana, 010000,  
Republic of Kazakhstan  
e-mail: [runit78@mail.ru](mailto:runit78@mail.ru)

**Tlepiyeva, Gulnar M.** —  
PhD, associate professor  
Eurasian National University named  
after L.N. Gumilev  
3 Satpaev Str., Astana, 010000,  
Republic of Kazakhstan  
e-mail: [tlepiyevagm@yandex.ru](mailto:tlepiyevagm@yandex.ru)

**Sattarova, Sholpan Sh.** —  
Lecturer  
Eurasian National University named  
after L.N. Gumilev  
3 Satpaev Str., Astana, 010000,  
Republic of Kazakhstan  
e-mail: [sholpan\\_09.94@mail.ru](mailto:sholpan_09.94@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.  
Received: November 16, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-135-148

## ANALYSIS OF CONSTRUCTION STATUS OF NAVIGABLE GATEWAY № 3 OF NOVINKINSKY HYDROELECTRIC COMPLEX

**K. P. Morgunov, G. G. Ryabov, M. V. Krasnikova**

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

*The main results of investigations of the state of the navigable lock No. 3 of the Novinkinsky hydrounit of the FBU «Administration «Volgo-Balt» are presented. The analysis of design, construction and operational documentation, field measurements and observations, results of previous surveys was carried out. The evaluation of the filtration regime in the base and backfill soils was carried out; the asymmetry of the depression curves was recorded on the left and right sides of the chamber. Sediments and horizontal movements of the gateway structures, their mutual displacement, are estimated. It was noted that the largest movement, both in the vertical and horizontal directions, was subjected to the camera section № 13 and the lower head of the lock. The presence of a crack in the concrete mass of the left base of the lower head of the lock is fixed. The dynamics of the development of the crack from the moment of its detection to the present time has been analyzed. The processes of soil removal into the chamber during its filling and emptying through the destroyed axial key in the bottom near section № 13 are described. It was noted that the measures for carburizing the base of the chamber with the aim of stopping the removal of soil into the interior of the cell to date have not led to a positive result. The possible causes of super-project movements of Section № 13 and the lower head of the lock are discussed, as well as the appearance and development of a crack in the bottom of the lower head. Such reasons could be the numerous subsidence of the soil on the site of the hydrosystem, caused, apparently, by a change in the process of exploiting the characteristics of the soil of the base-these are weak sandy soils in which decompensation may develop during the development of suffusion processes. Another possible reason is the poor quality of the works at the construction stage of the lock: poor performance of works on backfilling (failure to fill the layer seal, use of non-design soils), as well as poor quality of concrete caused by the use of local soil as a filler and a violation of concreting technology. Recommendations are given on the directions of further studies of the state of the structures of the hydrounit*

*Keywords: navigable gateway, filtration in soil, depression curve, draft sludge, mutual displacement of structures*

### **For citation:**

Morgunov, Konstantin P., Georgiy G. Ryabov, and Marina V. Krasnikova. "Analysis of construction status of navigable gateway № 3 of Novinkinsky hydroelectric complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 135–148. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-135-148.

**УДК 626.4**

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ШЛЮЗА № 3 НОВИНКИНСКОГО ГИДРОУЗЛА

**К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов, М. В. Красникова**

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

*Представлены основные результаты исследований состояния судоходного шлюза № 3 Новинкинского гидроузла ФБУ «Администрация «Волго-Балт». Проведен анализ проектной, строительной и эксплуатационной документации, данных натурных измерений и наблюдений, результатов предыдущих исследований. Выполнена оценка фильтрационного режима в грунтах основания и обратной засыпки, зафиксирована несимметричность кривых депрессии с левой и правой стороны камеры. Оценены осадки и горизонтальные перемещения конструкций шлюза, их взаимное смещение. Отмечено, что наибольшим перемещениям как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях подверглись секция № 13 камеры и нижняя голова шлюза. Зафиксировано наличие трещины в бетонном массиве левого устоя нижней головы шлюза. Проанализиро-*

вана динамика развития трещины с момента её обнаружения до настоящего времени. Описаны процессы выноса грунта внутрь камеры в процессе её наполнения и опорожнения через разрушенную осевую шпонку в днище в районе секции № 13. Отмечено, что мероприятия по цементации основания камеры с целью прекращения выноса грунта внутрь камеры до настоящего времени не привели к положительному результату. Обсуждены возможные причины сверхпроектных перемещений секции № 13 и нижней головы шлюза, а также возникновения и развития трещины в устье нижней головы. Такими причинами могли быть многочисленные просадки грунта на территории гидроузла, вызванные, по-видимому, изменением в процессе эксплуатации характеристик грунтов основания — слабых песчаных грунтов, в которых при развитии суффозионных процессов могли возникать разуплотнения. Другая возможная причина заключается в низком качестве выполнения работ на этапе строительства шлюза — некачественном выполнении работ по обратной засыпке (невыполнение послойного уплотнения, использование непроектных грунтов), а также низком качестве бетона, вызванном применением в качестве заполнителя местных грунтов и нарушением технологии бетонирования. Даны рекомендации по направлениям дальнейших исследований состояния конструкций гидроузла.

**Ключевые слова:** судоходный шлюз, фильтрация в грунте, депрессионная кривая, осадки конструкций, взаимные смещения конструкций.

**Для цитирования:**

Моргунов К. П. Анализ состояния конструкций шлюза № 3 Новинкинского гидроузла / К. П. Моргунов, Г. Г. Рябов, М. В. Красникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 135–148. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-135-148.

### Введение (Introduction)

Шлюз № 3 Новинкинского гидроузла расположен на северном склоне Волго-Балтийского канала, в 29,7 км от Онежского озера (рис. 1 и 2). Шлюз является сооружением II класса [1] и предназначен для пропуска судов и плотов, частичного сброса паводковых вод и поддержания подпорного уровня воды.

Начало строительства гидроузла — 1952 г., ввод шлюза № 3 в постоянную эксплуатацию — 27 октября 1964 г.



Рис. 1. Новинкинский гидроузел Волго-Балтийского канала



Рис. 2. Общий вид шлюза № 3 Новинкинского гидроузла



Шлюз № 3 — односторонний, однокамерный, расположен в нижнем бьефе, напорный фронт проходит по верхней голове шлюза. Максимальный расчетный напор на шлюзе — 13,10 м. Камера шлюза разделена температурно-осадочными швами на 13 секций, верхняя и нижняя головы — массивные железобетонные монолиты. Система наполнения — головная, из-под опускных рабочих ворот, опорожнение камеры производится через обходные водопроводные галереи в устоях нижней головы.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксплуатационным персоналом гидроузла осуществляются наблюдения [2], основными из которых в гидротехнической части являются инструментальные измерения уровней воды в пьезометрах, осадок высотных марок, горизонтальных перемещений конструкций и относительных смещений соседних элементов сооружения. Контролируется также фильтрационный расход в дренажах и глубины в подходных каналах.

Для оценки состояния конструкций шлюза № 3 Новинкинского гидроузла в 2017 г. специалистами ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» был выполнен комплекс исследований [3], включающий анализ данных многолетних наблюдений и материалов предыдущих обследований, выполнение работ по исследованию состояния бетона конструкций шлюза, проведение расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций.

### Результаты (Results)

**Анализ данных о фильтрационном режиме грунтовых вод в основании и обратной засыпке камеры шлюза.** Фильтрационный режим в грунтах основания шлюза № 3 контролируется грунтовыми пьезометрами и определяется характеристиками грунтов, особенностями рельефа и уровнями воды в бьефах [4] – [8]. Для улучшения оттока фильтрующейся в грунте воды с правой и левой стороны камеры шлюза понизу обратной засыпки устроены дренажные канавы. Характерные кривые депрессии приведены на рис. 3.

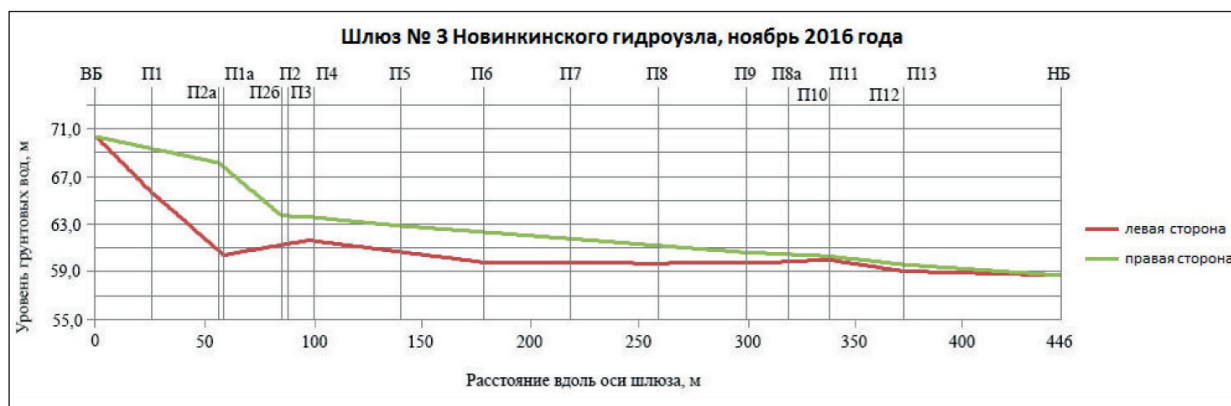


Рис. 3. Депрессионные кривые в грунте шлюза № 3 Новинкинского гидроузла в ноябре 2016 г.

Из рис. 3 видно, что депрессионные кривые, фиксируемые пьезометрами, расположенными с левой и правой стороны камер шлюза, в некоторой степени отличаются друг от друга (уровни с правой стороны выше). Наблюдения фиксируют также полное отсутствие воды в левой дренажной канаве, в течение последних лет наблюдения (с 1993 г.) она сухая. Это можно объяснить дополнительным притоком фильтрационных вод с правой, более высокой стороны гидроузла, а также дренированием фильтрационного потока в сторону расположенной слева долины реки Вытегры.

Напорным фронтом верхней головы гасится в среднем около 70 % общего напора на шлюз, что соответствует критериям безопасности гидроузла [2].



**Осадка конструкций шлюза.** Вертикальные перемещения (осадки) конструкций камеры шлюза определяются по отметкам геодезических марок, установленных на стенках камеры и устоях голов шлюза [9] – [11]. Анализ изменения отметок высотных марок показывает, что в период 1993 – 2017 гг. осадки всех секций стен камеры шлюза, за исключением секции № 13, а также левой стороны нижней головы весьма незначительны.

Декларацией безопасности определена интенсивность безопасного остаточного перемещения конструкций шлюза (критерий К1) не более 2 мм/г. Данные по осадкам марок секции № 13 камеры шлюза приведены в табл. 1.

Таблица 1

Осадка марок секции 13 шлюза № 3

| Сторона | Марки | Осадка с 1993 г. (за 23 года), мм | Интенсивность за 23 года, мм/год | Осадка за последние 10 лет, мм | Интенсивность за последние 10 лет, мм/год | Осадка за последние два года, мм | Интенсивность за последние два года, мм/год |
|---------|-------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| Левая   | M77   | 30,0                              | 1,30                             | 22,5                           | 2,25                                      | 8,0                              | 4,0                                         |
|         | M79   | 20,0                              | 0,87                             | 15,5                           | 1,55                                      | 8,0                              | 4,0                                         |
| Правая  | M78   | 20,0                              | 0,87                             | 13,0                           | 1,30                                      | 4,0                              | 2,0                                         |
|         | M80   | 25,0                              | 1,09                             | 16,0                           | 1,60                                      | 5,0                              | 2,5                                         |

График осадок конструкций тринадцатой секции камеры шлюза приведен на рис. 4.

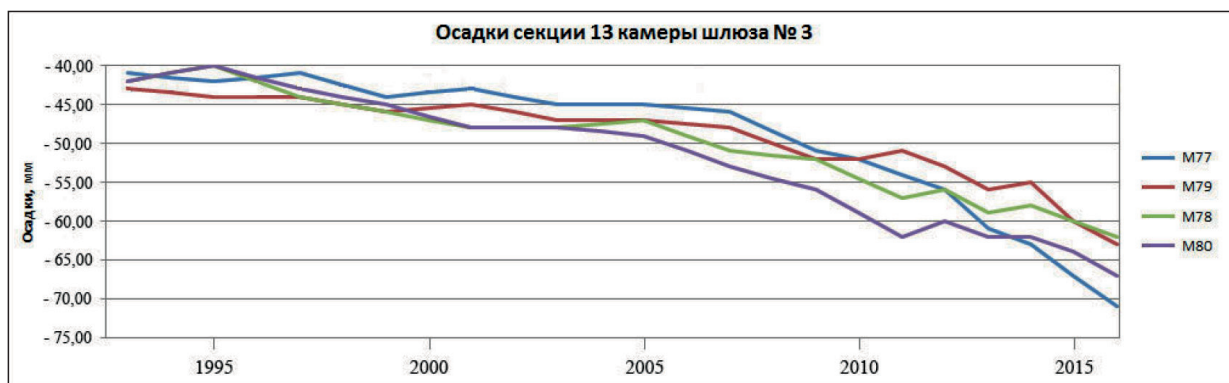


Рис. 4. Осадки марок тринадцатой секции шлюза № 3 в период 1993 – 2016 гг.

Фактические значения осадок нижней головы в период 1993 – 2016 гг. (за 23 года) приведены в табл. 2. Причем в течение последних лет наблюдается интенсификация осадок некоторых марок нижней головы.

Таблица 2

Осадка марок нижней головы шлюза № 3

| Сторона | Марки | Абсолютные перемещения (осадки), мм | Интенсивность, мм/год |
|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------|
| Левая   | M81   | 10,0                                | 0,43                  |
|         | M83   | 13,0                                | 0,57                  |
|         | M89   | 19,0                                | 0,83                  |
| Правая  | M82   | 2,0                                 | 0,09                  |
|         | M84   | 4,0                                 | 0,17                  |
|         | M90   | 6,0                                 | 0,26                  |



развития трещины тогда же, в 1985 г., на ней был установлен рамочный щелемер (рис. 8). Снятие показаний щелемера производится шесть раз в год, в навигационный период — при наполненной и опорожненной камере. График изменения продольных размеров трещины (вдоль оси шлюза), построенный по июльским замерам, приведен на рис. 9.

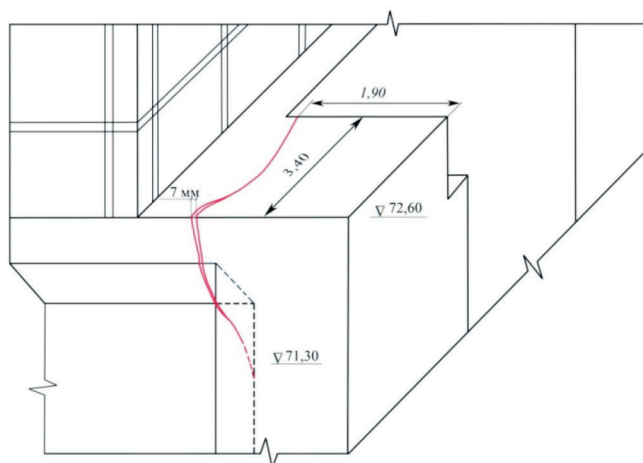


Рис. 7. Схема расположения трещины на левом устье нижней головы шлюза № 3



Рис. 8. Трещина с установленным на ней щелемером

Анализ этих измерений показывает, что с июля 1985 г. по апрель 1987 г. раскрытие трещины составило 2,6 мм, при этом в эксплуатационных отчетах за 1987 г. [12] персоналом шлюза отмечалась тенденция к движению «отколовшейся» части устоя в режиме «наполнение – опорожнение». Далее в период 1991 – 2011 гг. трещина развивалась со средней интенсивностью 0,27 мм/год, достигнув к 2011 г. размеров 5,4 мм. В последующие годы интенсивность раскрытия трещины уменьшилась. Максимального размера 7,8 мм трещина достигла в мае – июле 2015 г., затем её размеры начали уменьшаться. По состоянию на ноябрь 2016 г. размер трещины составил 6,3 мм. При опорожненной камере размеры трещины на 0,3 – 0,8 мм больше, чем при наполненной, однако летом эта тенденция либо проявляется весьма слабо, либо вообще отсутствует. По-видимому, это связано с прогревом бетонных конструкций в летнее время.

Раскрытие трещины на левом устье нижней головы шлюза № 3

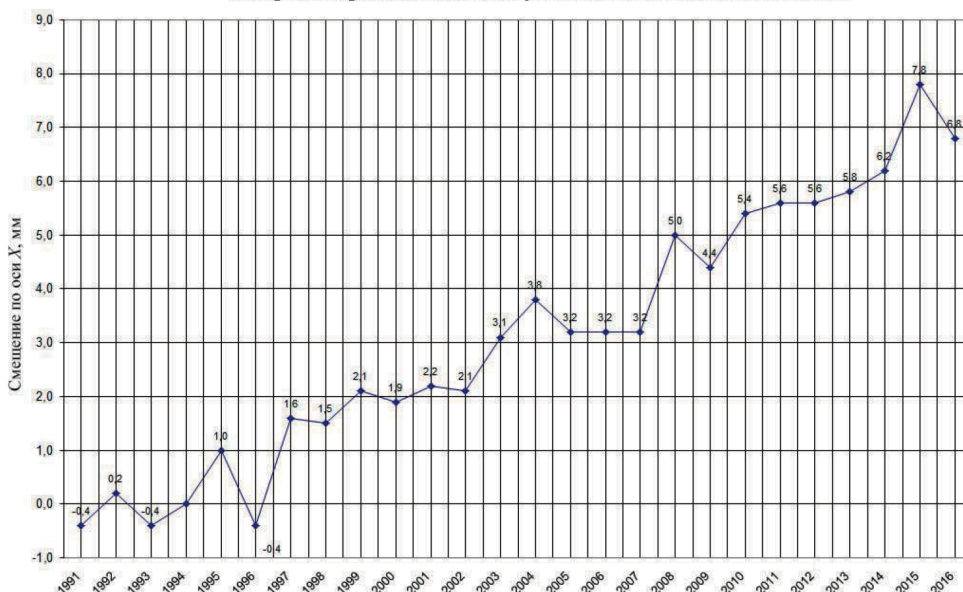


Рис. 9. График раскрытия трещины на НГ шлюза № 3 в течение 1991 – 2016 гг.

### Обсуждение (Discussion)

Можно предположить, что причины аномальных перемещений секции № 13 и нижней головы, а также возникновения и развития трещины в бетоне левого устоя одни и те же. Эксплуатационным персоналом шлюза № 3 в процессе наблюдений неоднократно были зафиксированы просадки грунта на территории, прилегающей к конструкциям шлюза. В результате было констатировано следующее:

- просадки грунта обратной засыпки за период эксплуатации наблюдались повсеместно: у голов и вдоль стен камеры шлюза;
- распределение объема просадок вдоль оси шлюза за период 1990 – 2015 гг. следующее: примерно одинаковое количество у верхней головы и вдоль камеры (около 8 – 9 м<sup>3</sup>), у нижней головы примерно вдвое ниже;
- по сторонам шлюза объем просадок приблизительно одинаков (несколько больше по левой стороне), при этом у правого устоя НГ просадки практически не фиксировались.

Наиболее значительная просадка грунта зафиксирована в июне 2011 г. в районе секции № 13, у правой стены камеры шлюза. Для выявления полного объема просадки было произведено вскрытие асфальта, обнаружен провал грунта первоначальных размеров 2,5 × 3,0 м и глубиной до 3,0 м. По дальнейшим приблизительным оценкам объем провала составил около 50 м<sup>3</sup> (рис. 10 а).

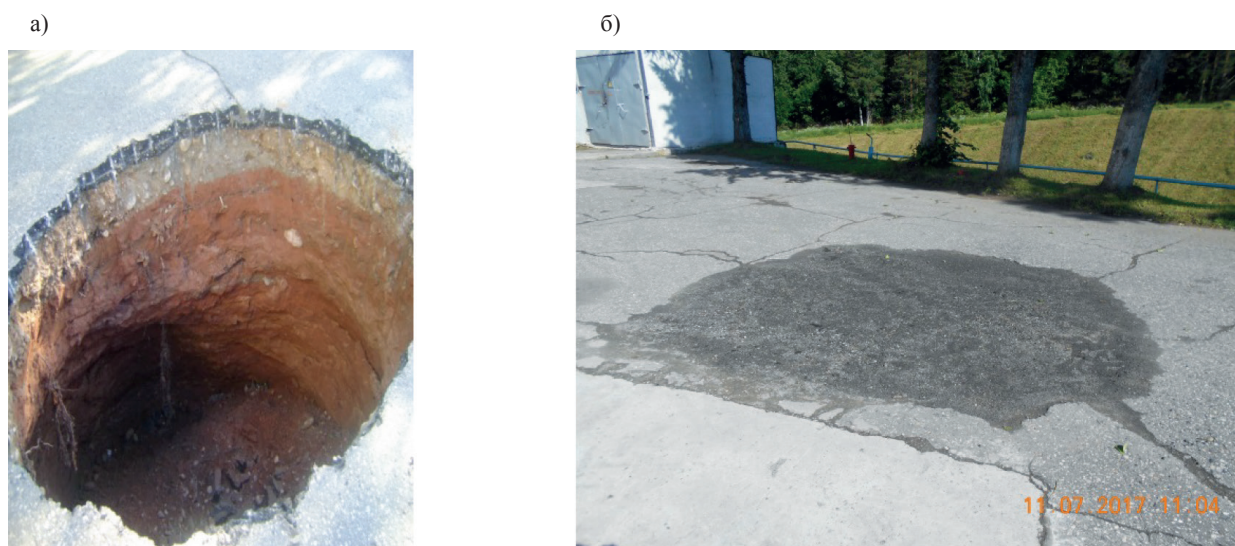


Рис. 10. Провал в районе секции № 13: а — после вскрытия асфальта (2011 г.), б — засыпанный провал территории в районе секции № 13 (2017 г.)

После засыпки провала грунтом с гидронамывом (август 2011 г.) просадки были непродолжительными, их объем ориентировочно составил до 30 м<sup>3</sup>. С 2011 г. осадки провала прекратились. На рис. 10, б приведено состояние засыпанного провала таким, каким оно сохраняется в последние годы.

Кроме того, при опорожнении камеры шлюза в межнавигационные периоды неоднократно фиксировалось проникновение внутрь камеры через осевую шпонку в районе секций № 12 и № 13 фильтрационных вод с выносом грунта (рис. 11).

По информации эксплуатационного персонала, практически при каждой откачке камеры объем выноса в районе осевой шпонки составлял 0,5 – 1,0 м<sup>3</sup>. В межнавигационные периоды 2007 – 2008 гг., 2012 – 2013 гг. и 2013 – 2014 гг. предпринимались попытки цементации основания камеры путем закачивания раствора под днище камеры через пробуренные скважины. Схема расположения очагов выноса грунта и скважин для закачки раствора у осевой шпонки секции № 13 приведена на рис. 12, однако выносы грунта внутрь камеры продолжались.



а)



б)

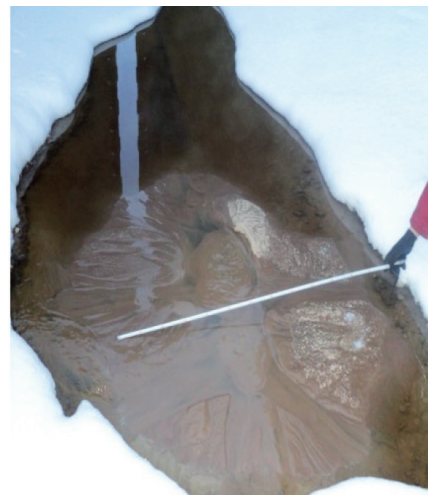


Рис. 11. Вынос грунта на осевой шпонке секции № 13 (а),  
замер объема выноса (б)

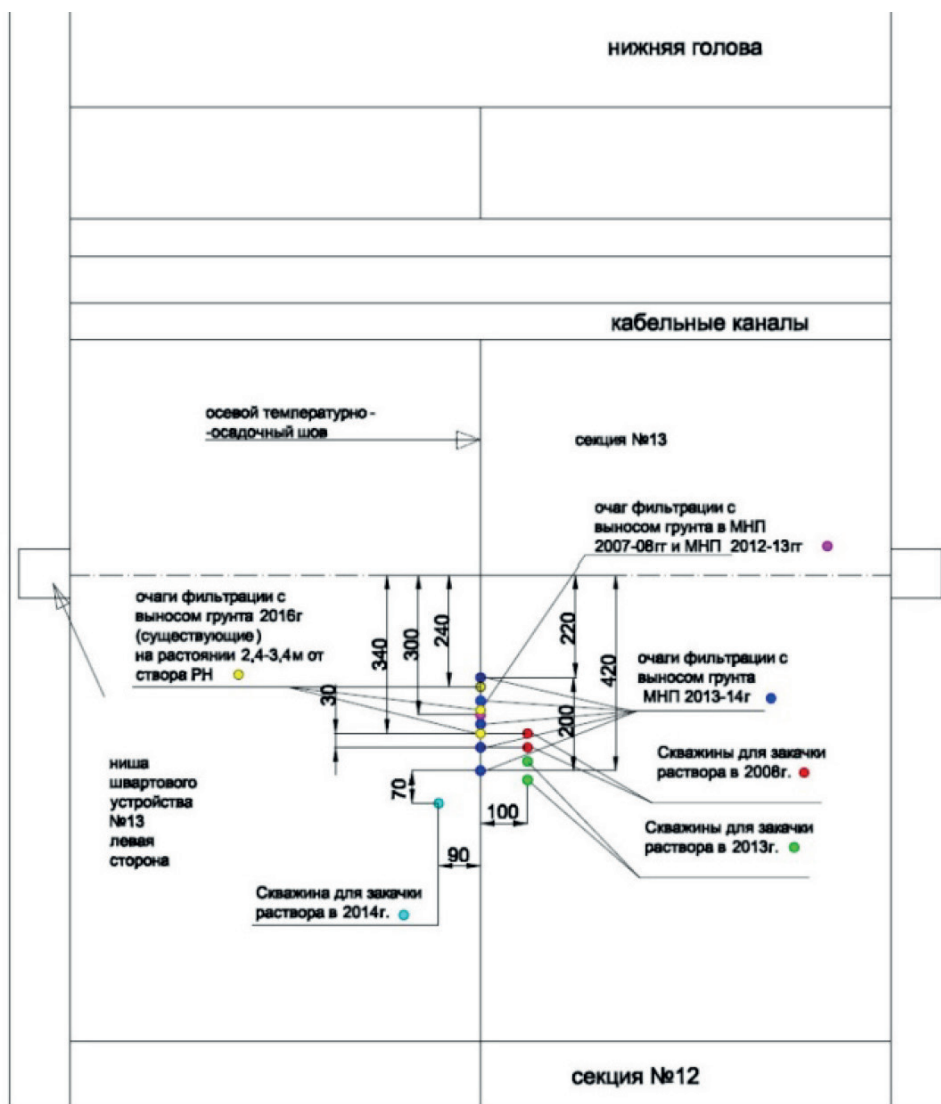


Рис. 12. Схема расположения очагов фильтрации и инъекционных скважин  
секции № 13 в 2007 – 2008 гг., 2012 – 2013 гг. и 2013 – 2014 гг.



Понятно, что деформации (просадки) грунта определяются характеристиками грунта и фильтрационным режимом грунтовых вод в основании и боковых засыпках конструкций шлюза. Информация о составе и параметрах грунтов содержится в проектных материалах по гидроузлу, кроме того, она имеется, например, в материалах «Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути» [13] ОАО «Ленгидропроект». На рис. 13 приведен геологический разрез грунтов в районе шлюза № 3.

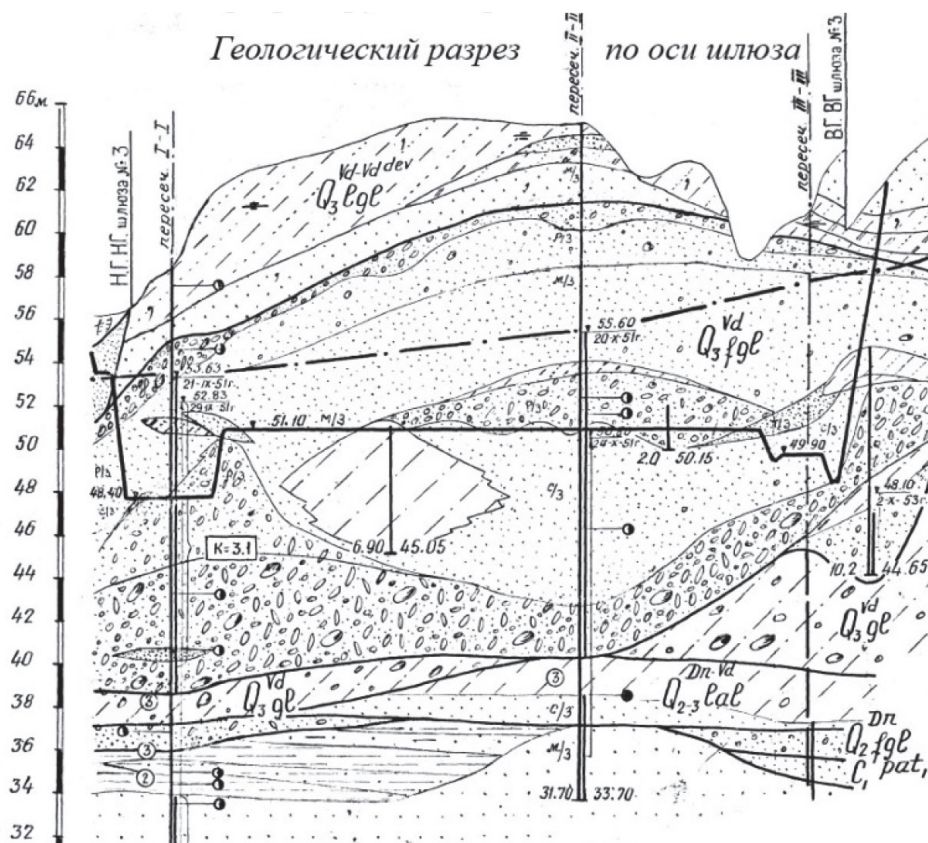


Рис. 13. Геологический разрез по оси шлюза № 3 Новинкинского гидроузла

Однако в этих материалах характеристики грунтов приняты по нормативным и проектным документам, а не по результатам современных инженерных изысканий. В соответствии с проектными данными шлюз № 3 врезан на глубину до 20 м от дневной поверхности. Основанием шлюза являются флювиогляциальные отложения, залегающие на валдайской морене. Основание камеры шлюза — пески, переходящие в песок с галькой, ниже — слой глины с линзами суглинка, затем пески. Основание верхней головы — в основном флювиогляциальные отложения, встречаются среднезернистые разности с линзами суглинков, на правых полусекциях — маренные суглинки. Основание нижней головы — пески с примесью гальки толщиной до 7,0 м, ниже — слой суглинка толщиной до 2,0 м, ещё ниже — песок с примесью гальки. При этом, как раз в районе левого устья нижней головы, проходило бывшее русло реки Вытегры.

В 2013 – 2014 гг. в ООО «ЭЦБ ГТС «Гидротехэкспертиза» (г. Москва) с привлечением специализированных организаций был выполнен комплекс работ по оценке состояния грунтов основания и засыпки камеры шлюза № 3 Новинкинского гидроузла и их влияния на состояние конструкций шлюза [14]. Работы включали проведение следующих работ:

- лазерного трехмерного сканирования, определившего формы обратной засыпки, положение стен камеры и голов шлюза;
- комплекса геофизических работ (георадиолокация, сейсмоакустика, вибродиагностика), позволившего обнаружить и локализовать зоны аномальных характеристик грунтов.

Результаты трехмерного лазерного сканирования показали, что в целом камера шлюза сохраняет свою геометрию, однако был зафиксирован непроектный уклон правой стены секции № 13 в сторону оси камеры. Кроме того, оказалось, что секция № 13 в течение периода эксплуатации (с 1964 г. по 2014 г.) имеет вертикальную осадку на 10 – 20 см больше, чем другие секции.

Геофизические методы не позволяют получить конкретные характеристики грунтов, однако дают возможность оценить сравнительную плотность грунтов, определить зоны грунта с характеристиками, качественно отличными от других: разуплотнение, переувлажнение и т. п. На основании выполненных исследований была составлена схема расположения зон с аномальными (отличными от соседних) характеристиками грунтов (рис. 14).

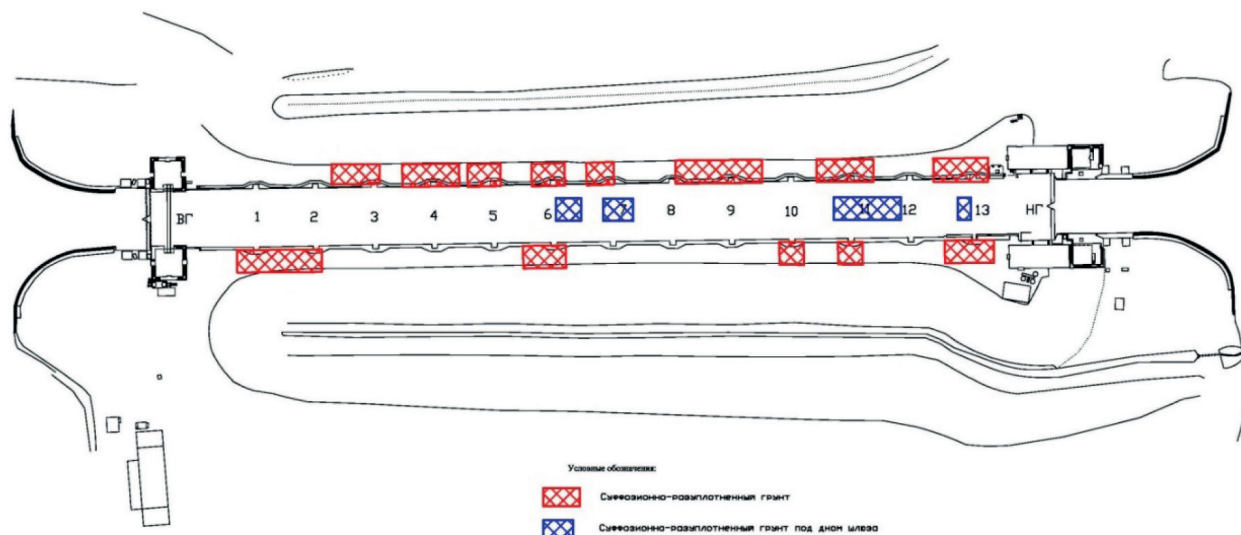


Рис. 14. Схема зон с аномальными характеристиками грунта на территории шлюза № 3

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что зоны с аномальными характеристиками (предположительно зоны разуплотнений и переувлажнений грунта) расположены практически на всей территории вокруг камеры и какой-то системы в их размещении не наблюдается.

### Заключение (Conclusion)

Анализ данных наблюдений и специальных исследований позволяет сделать следующие предположения о возможных причинах возникновения разуплотнений, аномальных осадок некоторых конструкций камеры и развития трещины на левом устое нижней головы.

1. В основании и засыпке камеры представлены зоны мелкозернистых и пылеватых песков, а также зоны крупнозернистых и гравелистых песков. При наличии соответствующего градиента фильтрационных потоков между этими зонами весьма вероятно развитие процессов внутренней суффозии, приводящих к возникновению областей с различной плотностью грунтов.

2. Разрушение осевой шпонки днища в районе секции № 13 привело к перемещению внутрь камеры в процессе наполнения / опорожнения объемов грунтовых вод и выносу грунта, что также способствовало возникновению зон разуплотнения в окрестности секции № 13.

3. Нельзя исключить возможность некачественного выполнения работ по обратной засыпке стен камеры при строительстве гидроузла. В этом случае возможно было как некачественное выполнение послойного уплотнения насыпаемого грунта, так и использование для засыпки непроектных грунтов: торфа, песка, попадание мерзлого грунта, льда, снега и т. п. О такой возможности косвенно свидетельствуют бессистемность и хаотичность расположения зон разуплотнений и провалов. Образование разуплотнений и даже пустот в массиве грунта приводит к возникновению провалов, которые фиксировались службами эксплуатации. Аналогичные процессы в районе секции № 13 и нижней головы привели к сверхпроектным осадкам и перемещениям этих кон-

струкций, а неравномерные осадки и деформации конструкций нижней головы могли привести к возникновению и дальнейшему развитию трещины в бетоне левого устоя.

4. Еще одной из возможных причин возникновения трещины в бетоне левого устоя нижней головы может быть невысокое качество бетона вследствие нарушения технологии бетонирования во время строительства. Бетонирование нижней головы шлюза осуществлялось в несколько ярусов отдельными блоками бетонирования, расположенными в шахматном порядке. Во время строительства при бетонировании конструкций нижней головы в качестве несъемной опалубки использовались плиты-оболочки. При этом блоки бетонирования выполнялись из бетона различных марок (графические материалы «Новинкинский гидроузел. Шлюз № 3. Нижняя голова. Монтажная схема армирования» ООО «Ленгидропроект»).

Анализ эксплуатационной документации позволяет сделать вывод о том, что еще на этапе строительства, в процессе возведения сооружения, использовался бетон с низкими прочностными характеристиками, обусловленными, прежде всего, применением заполнителя бетонной смеси низкого качества (с использованием местного грунта). Кроме того, отдельные этапы строительства осуществлялись в зимний период, что в совокупности с качеством смеси могло только усугубить снижение прочностных свойств массива. В частности, при укладке «слабого» бетона в период отрицательных температур материал подвергался температурным деформациям, которые (в данном случае) проявились в виде неравномерного распределения вяжущей составляющей и заполнителя.

Инструментальные обследования состояния и качества бетона, выполненные ЗАО «НПЦ материалов и добавок» в 2011 г. [15], свидетельствуют о том, что бетон нижней головы шлюза № 3 Новинкинского гидроузла пористый, трещиноватый и имеет сильно разнородную структуру, отмечено также слабое сцепление цементной составляющей с заполнителем. Выход кернов при выбуривании (отношение длины керна к глубине скважины) [16] для нижней головы шлюза был наименьшим — 44 – 71 % (в среднем 60 %) при среднем выходе по остальным конструкциям — 86 %. По некоторым данным бетонирование ниши осуществлялось после бетонирования основного устоя и установки ворот (неорганизованный холодный строительный шов). Кроме того, нижние ярусы днища и устоя (пол водопроводящих галерей) бетонировались крупными блоками без применения специальных мероприятий (трубное охлаждение, применение цементов с низким тепловыделением и т. п.).

Таким образом, к возникновению аномальных осадок некоторых конструкций камеры и трещины на левом устое нижней головы мог привести комплекс причин, а именно: слабые грунты в основании, суффозионные процессы, низкое качество бетона, несоблюдение технологии на этапе строительства.

Методы и способы устранения или хотя бы стабилизации развития трещины на верховой грани левого устоя нижней головы можно разрабатывать лишь на основе максимально полного изучения причин её возникновения. Для этого представляется целесообразным выполнение комплекса исследований, включающих:

- анализ строительной документации для получения максимально полной информации о качестве строительных материалов, использованных в конструкциях нижней головы, а также порядке, очередности и объемах работ по армированию и бетонированию конструкций;
- исследование характеристик грунтов основания, засыпки нижней головы шлюза и фильтрационных режимов в них в настоящее время, а также оценка влияния этих характеристик на устойчивость и перемещения конструкций.

*Научно-исследовательская работа «Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходных шлюзов ФБУ «Администрация «Волго-Балт» (Верхне-Свирский шлюз, Нижне-Свирский шлюз, шлюзы № 1 – 7)» финансировалась Федеральным агентством морского и речного транспорта Минтранса Российской Федерации.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О классификации гидротехнических сооружений. Постановление Правительства РФ от 2 ноября 2013 года № 986.
2. Декларация безопасности Новинкинского гидроузла. — СПб.: ФБУ «Администрация «Волго-Балт», 2013. — 143 с.
3. Проведение исследовательских работ, поверочно-теоретических расчетов прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходных шлюзов ФБУ «Администрация «Волго-Балт» (Верхне-Свирский шлюз, Нижне-Свирский шлюз, шлюзы №№ 1 – 7). Шлюз № 3 Новинкинского гидроузла // Отчет по НИР. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2017. — 232 с.
4. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Наука, 1977. — 664 с.
5. *Басниев К. С.* Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. — М.: Недра, 1993. — 416 с.
6. *Рассказов Л. Н.* Гидротехнические сооружения. — Ч. I / Л. Н. Рассказов [и др.]. — М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. — 576 с.
7. *Моргунов К. П.* Исследование изменения характеристик грунта в основании и засыпке судоходных шлюзов в процессе строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 78–88. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-78-88.
8. *Федорова Т. С.* Оценка напряженно-деформированного состояния грунтового массива камеры шлюза доковой конструкции / Т. С. Федорова, С. Н. Левачев // Вестник МГСУ. — 2017. — № 5 (104). — С. 519–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.519-528.
9. *Богомоллов А. Н.* Опыт проведения натурных наблюдений и исследований осадков земляных и бетонных сооружений в период строительства и временной эксплуатации на Волгоградском гидроузле / А. Н. Богомоллов, О. Н. Вольская, В. В. Подтелков, И. В. Якименко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. — 2016. — № 44-1 (63). — С. 93–102.
10. *Моргунов К. П.* Анализ напряженно-деформированного состояния элементов камер шлюзов Волгоградского гидроузла при различных условиях эксплуатации / К. П. Моргунов, М. В. Красникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.
11. *Левачев С. Н.* Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы / С. Н. Левачев, Т. С. Федорова // Вестник МГСУ. — 2013. — № 8. — С. 137–149.
12. *Лантратов Ю. Н.* Отчет по наблюдениям за трещинами в устоях нижних голов шлюзов № 3, 4 / Ю. Н. Лантратов, Е. В. Асонова. — Л.: УВБВП им. В. И. Ленина, Вытегорский РГС, 1987. — 24 с.
13. Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Волго-Балтийского водного пути (пояснительная записка 1887-1-ПОС3.1.ПЗ). — СПб.: ОАО «Ленгидропроект», 2010. — 187 с.
14. Обследование грунтов основания и обратной засыпки голов и камеры шлюза № 3 Новинкинского гидроузла ФБУ «Администрация «Волго-Балт». Технический отчет (заключительный). — М.: ООО «ЭЦБ ГТС «Гидротехэкспертиза», 2014. — 185 с.
15. Визуальное и инструментальное обследование состояния бетона шлюза № 3 Новинкинского гидроузла. Технический отчет. — СПб.: ЗАО «Научно-производственный центр материалов и добавок», 2011. — 118 с.
16. ГОСТ 28570-90 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции. — М.: Стандартинформ, 2005. — 10 с.

## REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation № 986 (2 Nov. 2013). O klassifikatsii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii.
2. *Deklaratsiya bezopasnosti Novinkinskogo gidrouzla.* SPb.: FBU «Administratsiya «Volgo-Balt», 2013.



3. *Provedenie issledovatel'skikh rabot, poverchno-teoreticheskikh raschetov prochnosti i ustoichivosti zhelezobetonnykh konstrukttsii sudokhodnykh shlyuzov FBU «Administratsiya «Volgo-Balt» (Verkhne-Svirskii shlyuz, Nizhne-Svirskii shlyuz, shlyuzy №№ 1 – 7). Shlyuz № 3 Novinkinskogo gidrouzla. Otchet po NIR.* SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2017.

4. Polubarinova-Kochina, P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod.* 2<sup>nd</sup> edition. M.: Nauka, 1977.

5. Basniev, K.S., I.N. Kochina, and V.M. Maksimov. *Podzemnaya gidromekhanika.* M.: Nedra, 1993.

6. Rasskazov, L.N., et al. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Chast' I.* M.: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2008.

7. Morgunov, Konstantin Petrovich. "Research of change of descriptions of soil in foundation and backfill of shipping lock in the process of building and exploitation of hydraulic construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 78–88. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-78-88.

8. Fedorova, Tatiana Sergeevna, and Stanislaw Nikolaevich Levachev. "Assessment of stress-strain state of soil mass of dock-type lock chamber." *Vestnik MGSU* 5(104) (2017): 519–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.519-528.

9. Bogomolov, Aleksandr Nikolaevich, Olga Nikolaevna Vol'skaya, Vasilii Vladimirovich Podtelkov, and Igor' Valer'evich Yakimenko. "Experience of field studies and researches of subsidence of earthwork and concrete structures during construction and temporary operation in the Volgograd hydroelectric station dam." *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture* 44-1(63) (2016): 93–102.

10. Morgunov, K. P., and M. V. Krasnikova. "Analysis of stress-strain state elements lock chamber Volgograd hydroelectric complex under different operating conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.

11. Levachev, Stanislav Nikolaevich, and Tat'yana Sergeevna Fedorova. "Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel." *Vestnik MGSU* 8 (2013): 137–149.

12. Lantratov, Yu.N., and E.V. Asonova. *Otchet po nablyudeniya za treshchinami v ustoyakh nizhnikh golov shlyuzov №№ 3–4.* L.: UVBVP im. V. I. Lenina, Vytegerskii RGS, 1987.

13. *Razrabotka i realizatsiya kompleksnogo proekta rekonstruktsii Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti (poyasnitel'naya zapiska 1887-I-POS3.1.PZ).* SPb.: OAO «Lengidroproekt», 2010.

14. *Obsledovanie gruntov osnovaniya i obratnoi zasyпки golov i kamery shlyuza № 3 Novinkinskogo gidrouzla FBU «Administratsiya «Volgo-Balt».* Tekhnicheskii otchet (zaklyuchitel'nyi). M.: OOO «ETsB GTS «Gidrotekspertiza», 2014.

15. *Vizual'noe i instrumental'noe obsledovanie sostoyaniya betona shlyuza № 3 Novinkinskogo gidrouzla.* Tekhnicheskii otchet. SPb.: ZAO «Nauchno-proizvodstvennyi tsentr materialov i dobavok», 2011.

16. Russian Federation. State Standard GOST 28570-90. Concretes. Methods of strength evaluation on cores drilled from structures. M.: Standartinform, 2005.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **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](mailto: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](mailto:RyabovGG@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **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](mailto: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](mailto:RyabovGG@gumrf.ru)



**Красникова Марина Валерьевна** — аспирант

*Научный руководитель:*

Моргунов Константин Петрович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [mvkrasnikova@yandex.ru](mailto:mvkrasnikova@yandex.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)

**Krasnikova, Marina V.** — Postgraduate

*Supervisor:*

Morgunov, Konstantin P.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,

198035, Russian Federation

e-mail: [mvkrasnikova@yandex.ru](mailto:mvkrasnikova@yandex.ru), [kaf\\_gsk@gumrf.ru](mailto:kaf_gsk@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 2017 г.*

*Received: December 8, 2017.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157

## WARNING OF REALIZATION OF DEGRADATION FAILURE OF ELEMENTS OF MECHANICAL EQUIPMENT OF WATER-TRANSPORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES

**N. M. Ksenofontov**

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

*In this paper a presents the results of a study of the possibility of preventing the failure of elements of mechanical equipment of water transport hydraulic structures, in particular navigable locks, as a result of the course of destructive aging processes. At present, technical diagnostics of mechanical equipment is carried out to prevent the implementation of such failures, including using methods and means of nondestructive testing. The methods used to control the technical condition of the elements of mechanical equipment generally meet modern requirements. Their use makes it possible to ensure the safety of structures with the available intensity of shipping traffic. As a result of the performed analysis of failures and damages of elements of the mechanical equipment of navigation locks it is established that one of the main aging processes is fatigue (corrosion-fatigue) damage, in particular, low-cycle fatigue. The analysis of the assessment of the technical condition of similar products abroad showed the identity of the aging processes of the elements and the directions for their timely detection. The paper presents a calculated dependence, which can be used in assessing the technical state of the elements of mechanical equipment, including when determining their remaining life time. As a result of the calculation and full-scale studies, laboratory and experimental tests, there is a high anisotropy of the enlarged elements of mechanical equipment for the distribution of mechanical stresses from the applied loads, as well as the dependence of the probability of damage from the strain-stress state of the site. In the final part of the work, proposals have been developed on the formation of rational systems for monitoring the technical condition of the elements of the mechanical equipment of navigation locks, taking into account the actual capabilities of the non-destructive testing methods used, as well as existing and prospective physical methods for estimating the strain-stress state.*

*Keywords: navigation lock, mechanical equipment, mechanical life, deterioration, technical diagnosis, strain-stress state, low-cycle fatigue.*

### **For citation:**

Ksenofontov, Nikolai M. "Warning of realization of degradation failure of elements of mechanical equipment of water-transport hydrotechnical structures." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 149–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157.

**УДК: 626.4; 626.5; 656.627.3; 656.627.4**

## ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДНО-ТРАНСПОРТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**Н. М. Ксенофонтов**

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

*В статье представлены результаты исследования возможности предупреждения реализации отказов элементов механического оборудования водно-транспортных гидротехнических сооружений, в частности судоходных шлюзов, в результате протекания деструктивных процессов старения. В настоящее время для предупреждения реализации подобных отказов проводится техническое диагностирование механического оборудования, в том числе с помощью методов и средств неразрушающего контроля. Используемые методы контроля технического состояния элементов механического оборудования в целом соответствуют современным требованиям. Их применение позволяет обеспечивать безопасность сооружений при имеющейся интенсивности судоходства. В результате выполненного анализа отказов*

и повреждений элементов механического оборудования судоводных шлюзов установлено, что одним из основных процессов старения является усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение, в частности малоцикловая усталость. Проведенный анализ оценки технического состояния подобных изделий за рубежом показал идентичность процессов старения элементов и направлений их своевременного обнаружения. В работе приведена расчетная зависимость, которая может быть использована при оценке технического состояния элементов механического оборудования, в том числе при определении их остаточного ресурса. В результате проведения расчетных и натурных исследований, лабораторных и экспериментальных испытаний отмечается наличие высокой анизотропии укрупненных элементов механического оборудования по распределению механических напряжений от приложенных нагрузок, а также зависимость вероятности образования повреждений от напряженно-деформированного состояния участка. В заключительной части работы сформулированы предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния элементов механического оборудования судоводных шлюзов с учетом фактических возможностей применяемых методов неразрушающего контроля, а также существующих и перспективных физических методов оценки напряженно-деформированного состояния.

**Ключевые слова:** судоводный шлюз, механическое оборудование, срок службы, старение, техническое диагностирование, напряженно-деформированное состояние, малоцикловая усталость.

**Для цитирования:**

Ксенофонтов Н. М. Предупреждение реализации деградационных отказов элементов механического оборудования водно-транспортных гидротехнических сооружений / Н. М. Ксенофонтов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 149–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157.

### Введение (Introduction)

Расчетный срок службы водно-транспортных гидротехнических сооружений, в том числе судоводных шлюзов, составляет 100 лет [1], их механического оборудования — 25 лет [2]. За исключением отдельных случаев замены, связанных с реконструкцией сооружений, основные элементы механического оборудования (МО) находятся в эксплуатации дольше указанного срока. Например, в настоящее время на отечественных судоводных гидротехнических сооружениях эксплуатируется примерно тысяча металлоконструкций ворот и затворов различного назначения и конструктивного исполнения. Примерно для 50 % из них срок службы составляет более 25 лет, тем не менее значительная часть данного оборудования находится в эксплуатации более 40 лет [3].

Одной из основных причин ремонта и/или замены элементов МО является воздействие деструктивных процессов старения, снижающих их техническое состояние, в частности усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение [4], [5] (рис. 1 и 2), неконтролируемое развитие которого может привести к внезапному деградационному отказу элемента [6]. Примером является авария на Пермском шлюзе в ноябре 1994 г. [7]. Для предупреждения реализации подобных отказов проводится техническое диагностирование механического оборудования и, в частности, контроль его технического состояния с применением методов и средств неразрушающего контроля, позволяющих своевременно выявлять поврежденные участки и элементы.



Рис. 1. Развитие усталостной трещины вдоль зуба колеса открытой передачи

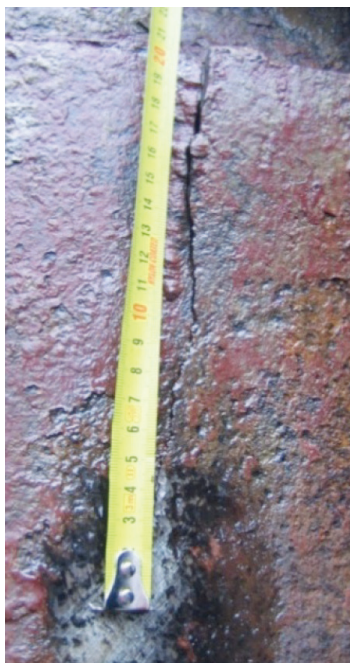


Рис. 2. Коррозионно-усталостное повреждение полки ригеля основных двустворчатых ворот

В табл. 1 приведены сведения о характерных деструктивных процессах старения элементов МО судоводных шлюзов и используемых в настоящее время источниках информации при оценке их технического состояния.

Таблица 1

**Источники информации, используемые в настоящее время для оценки технического состояния МО водно-транспортных гидротехнических сооружений**

| Наименование процесса старения                     | Информация, используемая для оценки технического состояния изделия |                  |                              |                              |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                                    | априорная <sup>1</sup>                                             | апостериорная    |                              |                              |
|                                                    |                                                                    | ВИК <sup>2</sup> | МНК <sup>3</sup>             | определение НДС <sup>4</sup> |
| Коррозия металла                                   | +                                                                  | +                | +<br>Изм. $s_i$ <sup>5</sup> | +                            |
| Коррозионная усталость                             | +                                                                  | +                | —                            | +                            |
| Усталость                                          | +                                                                  | +                | +                            | +                            |
| Изнашивание трением                                | +                                                                  | +                | —                            | —                            |
| Накапливание механических повреждений и деформаций | +                                                                  | +                | —                            | —                            |
| Изменение пространственного положения элементов    | +                                                                  | +                | X                            | +                            |

Примечания:

1. *Априорная информация* — это информация, полученная до проведения измерений при анализе проектной, монтажной и приемо-сдаточной документации, результатов предыдущих оценок технического состояния и наблюдений, актов преддекларационных обследований, материалов о проведении ремонтно-восстановительных работ, сведений об опыте и условиях эксплуатации, нормативных актов и технической литературы.
2. ВИК — визуально-измерительный контроль.
3. МНК — методы неразрушающего контроля.
4. НДС — напряженно-деформированное состояние.
5. Изм.  $s_i$  — измерение остаточной толщины элемента.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ информации по отказам элементов МО судовых шлюзов показывает, что значительная часть из них произошла при числе циклов нагружения  $N_i$  в диапазоне  $10^4 \dots 10^5$ . Значения циклических напряжений во многих случаях превышают предел усталости материала  $\sigma_{-1}$  элементов, установленный при числе испытаний  $10^5 \dots 10^8$  циклов [8]. При таких напряжениях отмечается значительная пластическая деформация материала в вершине зарождающихся дефектов при каждом цикле нагружения [8], [9]. В результате происходит их накопление, интенсифицируемое циклической анизотропией свойств материала. Процесс классифицируется [8], [9] как квазистатический тип малоциклового разрушения при условиях, близких к статическому нагружению до разрыва. Результатом процесса является образование в зонах максимальных деформаций макротрещин усталостного типа.

На рис. 3 представлена расчетная кривая малоциклового усталости для углеродистых сталей [9], отличающаяся от традиционных усталостных кривых [8] относительно малым числом циклов до разрушения элемента ( $N_i < 10^5$ ) и отсутствием горизонтального участка кривой. Представленная на этом рисунке расчетная зависимость  $N_i = f(\sigma)$  может быть использована при формировании системы контроля технического состояния МО судовых шлюзов для прогнозирования остаточного ресурса элементов и оптимизации сроков их проверки методами неразрушающего контроля при условии наличия информации об их НДС. Очевидно, что наряду с наличием в деталях и укрупненных узлах МО участков, в которых напряжения  $\sigma_a > \sigma_{-1}$  и процесс разрушения происходит в соответствии с ранее приведенной моделью сопротивления металлов усталостному разрушению при малом числе циклов нагружения, имеются участки с различными уровнями напряжений, процесс образования и развития дефектов в которых происходит в соответствии с классическим представлением об усталостном разрушении материалов.

Из результатов выполненного анализа литературных источников, натурных и расчетных исследований [10], [11] следует, что напряженно-деформированное состояние множества элементов, совокупность которых формирует укрупненный элемент МО (створки шлюзовых ворот, грузовые колеса механизмов привода), имеет большой диапазон возможных значений от 0 до  $\sigma_b$ . Это свидетельствует о высокой анизотропии укрупненного элемента МО по данному показателю, что позволяет рассматривать его как совокупность  $i$  конечных множеств с различными значениями показателя напряженности.

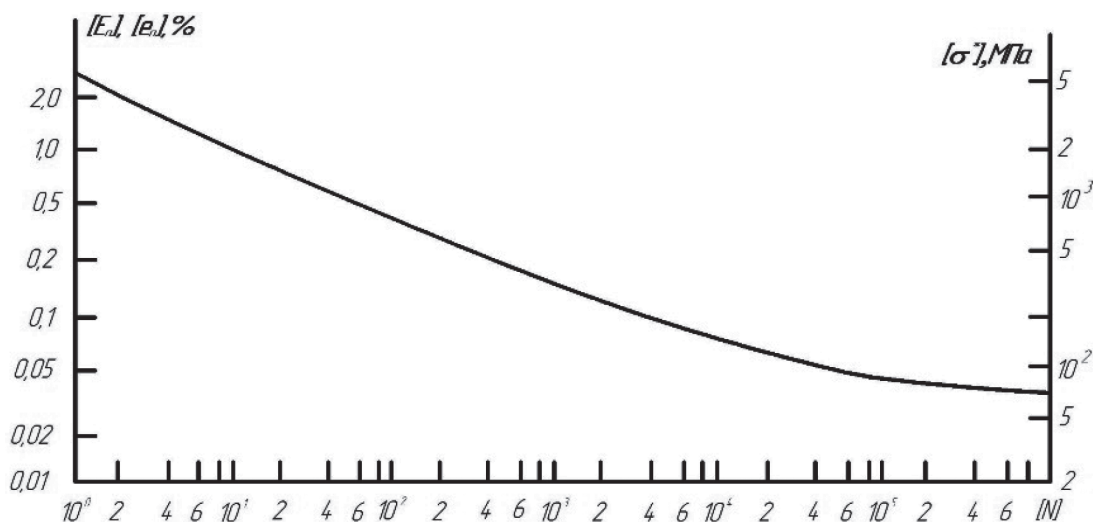


Рис. 3. Кривая малоциклового усталости

В работах [12], [13] для количественной оценки показателя напряженности локального участка элемента используется коэффициент снижения предела выносливости  $K$  с учетом всех факторов:



$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1д}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости материала при фактическом режиме нагружения;

$\sigma_{-1д}$  — предел выносливости детали, изготовленной из материала со справочным значением  $[\sigma_{-1}]$ .

По данным [12], значения коэффициента  $K$  изменяются от двух до шести. В работе [14] верхние значения этого показателя достигают 10. Снижение  $[\sigma_{-1д}]$  относительно  $[\sigma_{-1}]$  обусловлено следующими факторами:

- наличием в детали участков концентрации напряжений (конструктивных, технологических или эксплуатационных), каждый из которых оценивается коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma$ ;

- наличием остаточных напряжений, на величину которых рекомендуется увеличить [9] напряжения  $\sigma_a$  от внешних нагрузок.

В работах [8], [12] рассматриваются также такие факторы, как влияние на  $\sigma_{-1д}$  масштабного фактора, изменения температуры, состояния поверхности, вибрации и т. д. Указанные обстоятельства приводят к формированию в условиях реального нагружения элементов, на их наиболее нагруженных участках, суммирующих напряжений  $\sigma_c$ , величина которых значительно отличается от результатов испытаний образцов на усталость материала  $\sigma_{-1}$  в зависимости от фактического наличия и количественного влияния вышеуказанных факторов. Из этого следует, что в качестве наиболее объективного показателя, характеризующего напряженность элементов, работающих в условиях циклического нагружения, следует рассматривать показатель, характеризующий фактическое положение элемента на классической кривой усталостного разрушения [8], [9] в текущий момент времени:

$$n_\sigma^c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}. \quad (2)$$

Без учета дополнительных факторов, влияние которых на  $\sigma_c$  рассмотрено в работах [8], [9], суммарные напряжения на наиболее напряженном участке, в соответствии с рекомендациями [9], следует рассматривать в виде

$$\sigma_c = \Delta\sigma + \sigma_{ост} + \sigma_a, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma = f(K_\sigma)$  — изменение уровня напряжений, обусловленное наличием концентраторов напряжений (конструктивных, технологических и эксплуатационных);

$\sigma_{ост}$  — остаточные напряжения;

$\sigma_a$  — напряжения от внешних штатных нагрузок.

Наличие количественной оценки показателя  $n_\sigma^c$  позволяет определить положение элемента на кривой усталостного разрушения [8], [9] в текущий момент времени, что позволяет объективно прогнозировать остаточный ресурс и установить уровень вероятных повреждений, соответствующих виду и этапу развития процесса. Однако ни один из существующих методов определения напряжений не позволяет с достаточной точностью предоставить информацию о составляющих  $\sigma_c$ . Например, широко используемый метод конечных элементов (МКЭ) дает возможность, как правило, определить только величину напряжений от внешних нагрузок  $\sigma_a$  в упругопластической зоне.

### Результаты (Results)

Своевременное выявление результатов протекания деструктивных процессов старения, в частности усталостного, развитие которых способно привести к отказу детали или укрупненного элемента механического оборудования судоводного гидротехнического сооружения, а также прогнозирование их остаточного ресурса является задачей технического диагностирования [15]. Представляется целесообразным развитие диагностических систем в направлении постепенного снижения уровня информационной энтропии [16] путем использования дополнительных контро-

лируемых параметров, в частности  $\sigma_c$ , или ее составляющих, с учетом расчетных возможностей (МКЭ) и перспективных физических методов оценки НДС. С учетом этого в табл. 2 приведены предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния МО СГТС с учетом фактических возможностей методов и средств, указанных в табл. 1, а также оценки НДС, анализ которых позволил уточнить зоны их применения. Апробация данных предложений представлена в работе [10].

Таблица 2

**Формирование рациональной системы контроля технического состояния МО СГТС  
при наличии информации о величине  $\sigma_c$**

| Механическая характеристика материала по величине напряжения | $N$ множества $i$ | Диапазон $\sigma_c$ для малоуглеродистых сталей, МПа | Отношение $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}$ | Возможность выявления участков образования усталостных трещин |                   |                  |                                                      |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------------------------------|
|                                                              |                   |                                                      |                                          | МКЭ                                                           | МНК <sup>1</sup>  |                  |                                                      |
|                                                              |                   |                                                      |                                          |                                                               | ФМИН <sup>2</sup> | ВИК <sup>3</sup> | МПД <sup>4</sup> , ЦД <sup>5</sup> , ВТ <sup>6</sup> |
| $0 \dots \sigma_{-1}$                                        | $i_1$             | 0 – 50                                               | $\gg 1$                                  | +                                                             | +                 | –                | –                                                    |
|                                                              | $i_2$             | 50 – 100                                             | $\geq 1$                                 | +                                                             | +                 | –                | +                                                    |
|                                                              | $i_3$             | 100 – 150                                            | $\approx 1$                              | +                                                             | +                 | –                | +                                                    |
|                                                              | $i_4$             | 150 – 250                                            | $\leq 1$                                 | +                                                             | +                 | –                | +                                                    |
| $\sigma_{-1} \dots \sigma_T$                                 | $i_5$             | 250 – 350                                            | $< 1$                                    | +                                                             | +                 | +                | +                                                    |
| $\sigma_T \dots \sigma_B$                                    | $i_6$             | 350 – 450                                            | $\ll 1$                                  | –                                                             | +                 | +                | +                                                    |

Примечания:

1. МНК — методы неразрушающего контроля.
2. ФМИН — физические методы измерения напряжений.
3. ВИК — визуально-измерительный контроль.
4. МПД — магнитопорошковая дефектоскопия;
5. ЦД — цветная дефектоскопия.
6. ВТ — вихревой контроль.
7. Значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$ , предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности материала  $\sigma_B$  приведены для стали 09Г2С.

### Обсуждение (Discussion)

Состав контролируемых параметров элементов МО, методов и технических средств их измерения формировались на отечественных судоходных гидротехнических сооружениях в 70 – 90-х гг. XX в. Используемые методы контроля технического состояния элементов МО в целом соответствуют современным требованиям. Проведенный анализ оценки технического состояния подобных изделий за рубежом показал идентичность процессов старения элементов и направлений их своевременного обнаружения [17] – [19]. Сведения о состоянии современных методов и средств получения диагностической информации механических систем позволяют предположить, что некоторые из них могут быть использованы для совершенствования системы контроля технического состояния МО СГТС в следующих направлениях:

- увеличение долговременности диагностического прогноза;
- локализация контролируемых участков элементов;
- изменение состава контролируемых параметров с учетом возможностей современных методов и технических средств.

Наиболее перспективными из них являются методы оценки НДС. Однако в настоящее время отсутствуют освоенные методы и средства оперативной локализации участков контроля и выявления потенциально-опасных участков, измерения уровня приложенных напряжений, в том числе на участках их концентрации. Вследствие необходимости проведения исследований для определения применимости методов контроля в условиях эксплуатации диагностируемых объектов,

конструктивного совершенствования средств контроля, отработки системы его метрологического обеспечения и создания нормативной базы практическое использование новых методов контроля, как правило, реализуется через несколько лет после получения первых положительных результатов. При этом они постепенно могут вытеснять устаревшие с недостаточными диагностическими характеристиками. Представляется оправданным опыт ОАО «Газпром» [20], где применяется технология комплексной диагностики газопроводов. В частности, для оценки их НДС используются ультразвуковые, тензометрические, магнитные и электромагнитные методы контроля.

Следует отметить, что при оценке технического состояния элементов МО СГТС также используются методы и средства определения их НДС. Для определения напряжений на ответственных деталях МО сооружений ФГУП «Канал имени Москвы» с 1975 г. по настоящее время применяется тензометрический метод. Для оценки НДС элементов МО выполняются расчетные исследования, позволяющие локализовать опасные участки и уточнить значения остаточного ресурса.

Развитие систем контроля технического состояния СГТС в указанных направлениях могло бы способствовать, в частности, повышению надежности и долговечности сооружений и элементов МО.

### Выводы (Summary)

1. Одним из основных деструктивных процессов старения, снижающих техническое состояние элементов МО СГТС, является усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение, в частности, малоцикловая усталость.

2. Установлена высокая анизотропия, по показателю распределения напряжений, укрупненных элементов МО СГТС.

3. Существующая система контроля технического состояния МО СГТС с высокой интенсивностью судопропуска в целом соответствует требуемому в настоящее время уровню надежности.

4. Приведенная расчетная зависимость может использоваться при оценке технического состояния элементов МО СГТС, для прогнозирования остаточного ресурса элементов и оптимизации сроков их проверки методами неразрушающего контроля при условии наличия информации об их НДС.

5. Предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния элементов механического оборудования позволяют обеспечить необходимый уровень их безопасности.

6. Применение физических методов определения напряженно-деформированного состояния при оценке технического состояния элементов механического оборудования с учетом их особенностей требует лабораторных и экспериментальных исследований, а также проверок в эксплуатационных условиях, подтверждающих возможность их использования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М.: Минрегион России, 2012. — 39 с.
2. Письмо ОАО «Трест Гидромонтаж» СПКТБ «Ленгидросталь» № 2/2-41/7-274 от 21.04.2000 г.
3. Колесников Ю. М. Проведение исследований технического состояния и уровня безопасности эксплуатируемых судоходных гидротехнических сооружений с анализом динамики изменения их показателей на основе данных отраслевого мониторинга: отчет о НИР / Ю. М. Колесников. — М.: Российский Речной Регистр, 2014.
4. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 48 с.
5. Терентьев В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — М.: Наука, 2015. — 480 с.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 24 с.
7. Макаров В. И. Предельный износ металлоконструкций ворот Пермского шлюза, связанный с поте-

рей несущей способности основных узлов и элементов вследствие их длительной эксплуатации, расчетных и конструктивных недостатков / В. И. Макаров // Международная науч.-техн. конф. «Вопросы обеспечения устойчивости и безопасности гидротехнических сооружений». — М.: ЦБНТИ речного транспорта, 1995. — С. 22.

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

9. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

10. Кузьмицкий М. Л. Определение уровня напряжений на колесах открытых зубчатых передач / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, И. Н. Базавлук // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 55–63.

11. Ксенофонтов Н. М. Динамика развития процессов старения элементов металлоконструкций двустворчатых ворот судоходных шлюзов / Н. М. Ксенофонтов, В. Н. Лошак // Гидротехника. XXI век. — 2017. — № 1. — С. 68.

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

13. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 55 с.

14. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник / М. Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 231 с.

15. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2009. — 11 с.

16. Кузьмицкий М. Л. Анализ и перспективы развития моделей предупреждения отказов механических систем судоходных гидротехнических сооружений, обусловленных усталостным разрушением элементов / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов // Гидротехническое строительство. — 2015. — № 5. — С. 28–32.

17. ETL 1110-2-566. Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates / Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers. — Washington, 2010. — 115 p.

18. Langston M. Fatigue Analysis of the Greenup Lock Gate on the Ohio River / M. Langston // Undergraduate Honors Thesis Program in Civil Engineering University of Arkansas. — 2017. — Vol. 7. — 15 p.

19. Wermundsen T. Efficient Evaluation of Fatigue and Damage in Welded Joints from Finite Element Analysis / T. Wermundsen. — Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, 2014. — 95 p.

20. Коннов В. В. Комплексная дистанционная диагностика подземных газопроводов / В. В. Коннов // Территория NDT. — 2013. — № 2. — С. 42.

## REFERENCES

1. Russian Federation. Set of rules SP 58.13330.2012. Hydraulic Structures. Basic statements. M.: Minregion Rossii, 2012.

2. Pis'mo OAO «Trest Gidromontazh» SPKTB «Lengidrostal'» №2/2-41/7-274 ot 21.04.2000 g.

3. Kolesnikov, Yu.M. *Provedenie issledovaniy tekhnicheskogo sostoyaniya i urovnya bezopasnosti ekspluatiruemykh sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii s analizom dinamiki izmeneniya ikh pokazatelei na osnove dannykh otraslevogo monitoringa: Otchet o NIR*. M.: Rossiiskii Rechnoi Registr, 2014.

4. Russian Federation. State Standard GOST 23207-78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols. M.: Izdatel'stvo standartov, 1981.

5. Terent'ev, V.F., and S.A. Korableva. *Ustalost' metallov*. M.: Nauka, 2015.

6. Russian Federation. State Standard GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. M.: Standartinform, 2016.

7. Makarov, V.I. "Predel'nyi iznos metallokonstruktsii vorot Permskogo shlyuza, svyazannyi s poterei nesushchei sposobnosti osnovnykh uzlov i elementov sledstvie ikh dlitel'noi ekspluatatsii, raschetnykh i konstruktivnykh nedostatkov." *V sb. Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Voprosy obespecheniya ustoichivosti i bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii»*. M.: TsBNTI rechnogo transporta, 1995: 22.

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

9. Kogaev, V.P., N.A. Makhutov, and A.P. Gusenkov. *Raschety detalei mashin i konstruktsii na prochnost' i*

*dolgovechnost'*. M.: Mashinostroenie, 1985.

10. Kuz'mitskii, M.L., N.M. Ksenofontov, and I.N. Bazavluk. "Determination of the level of stresses on wheels of open gears." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3(19) (2013): 55–63.

11. Ksenofontov, N.M., and V.N. Loshak. "Dinamika razvitiya protsessov stareniya elementov metallokonstruktsii dvustvorchatykh vorot sudokhodnykh shlyuzov." *Gidrotekhnika. XXI vek* 1 (2017): 68.

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

13. Russian Federation. State Standard GOST 25.504-82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation. M.: Izdatel'stvo standartov, 1982.

14. Stepanov, M.N. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy. Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1985.

15. Russian Federation. State Standard GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. M.: Standartinform, 2009.

16. Kuz'mitskii, M.L., and N.M. Ksenofontov. "Analiz i perspektivy razvitiya modelei preduprezhdeniya otkazov mekhanicheskikh sistem sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii obuslovlennykh ustalostnym razrusheniem elementov." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 5 (2015): 28–32.

17. ETL 1110-2-566. *Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates / Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers*. Washington, 2010.

18. Langston, M. "Fatigue Analysis of the Greenup Lock Gate on the Ohio River." *Undergraduate Honors Thesis Program in Civil Engineering University of Arkansas*. 2017. Vol. 7.

19. Wermundsen, T. *Efficient Evaluation of Fatigue and Damage in Welded Joints from Finite Element Analysis*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, 2014.

20. Konnov, V.V. "Kompleksnaya distantionnaya diagnostika podzemnykh gazoprovodov." *Territoriya NDT* 2 (2013): 42.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Ксенофонтов Николай Михайлович** —

аспирант, научный сотрудник

*Научный руководитель:*

Кузьмицкий Михаил Леонидович —

доктор технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Ksenofontov, Nikolai M.** —

Postgraduate, researcher

*Supervisor:*

Kuzmitskiy, Mikhail L. —

Dr. of Technical Sciences

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 11 декабря 2017 г.*

*Received: December 11, 2017.*



## INVESTIGATION OF EFFECTS ARISING IN THE PROCESS OF PNEUMATIC CLEANING OF THE RAW WATER INTAKE SCREENS

**A. K. Afanasev, M. P. Lebedeva, Yu. V. Yatsuk**

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

*The process of development of gas-liquid flow output from raw water intake is under consideration in the work. The main target of work was to free surface bump dimensions determine and the opportunity of bump dimensions influence on navigation safety obtain. The description process was based on towing tank tests results of two different prototype units and of it's simplify model as well. The results recalculation on the real condition was done using Froude number, Reynolds number and Weber number. The speed feeding of compressed air was calculated taking into account the power consumption of device. The towing tank tests results show that the form of free surface bump on surface projection is approximate circle. The circle diameter is equal to raw water intake length. The gas-liquid flow divided into separate bubbles near output of device but before the filter surface. The bubbles come to the surface separately. No tendency to combine the small bubbles into large one was observed. The angle between the free surface bump slope and smooth free surface concur with angle of wave slope. So the bump could be dangerous for the small boat with poor seaworthiness. The sudden roll angle enlarge could be the reason of boat overturn.*

*Keywords: raw water intake, gas-liquid flow, two-phase flow, gas jet in the water, safety of river ships navigation.*

**For citation:**

Afanasev, Andrei K., Marina P. Lebedeva, and Yury V. Yatsuk. "Investigation of effects arising in the process of pneumatic cleaning of the raw water intake screens." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 158–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-158-169.

**УДК 628.113.82; 629.122; 532.517**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РУСЛОВЫХ ВОДОЗАБОРНИКОВ

**А. К. Афанасьев, М. П. Лебедева, Ю. В. Яцук**

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

*Рассматривается процесс развития газожидкостной струи, возникающей при продувке воздухом фильтрующих элементов (сеток, решёток) русловых водозаборников. Целью работы является определение размеров бугра, возникающего на свободной поверхности и оценка возможности его влияния на безопасность судоходства в акватории. В рамках работы в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» были испытаны два макета водозаборников и схематизированная модель. Испытания проводились с учетом критериев подобия Фруда, Рейнольдса и Вебера. Описана экспериментальная установка и методика проведения испытаний. Полученные результаты позволили выполнить оценку размеров газожидкостного бугра, возникающего на поверхности воды. В ходе испытаний, проведенных в гидродинамическом лотке ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», была получена качественная оценка взаимодействия газожидкостной струи с внешним течением. На завершающем этапе работ были проведены наблюдения процесса продувки натурного водозаборника, установленного в русле реки. Определено, что на спокойной поверхности воды образуется бугор, имеющий круглую форму в плане. Диаметр пузыря приблизительно равен длине водозаборника. Проведенный анализ показал, что эффекты, сопровождающие процесс продувки водозаборников, установленных в районах, открытых для судоходства,*

не представляют опасности для средних и крупных судов. В то же время возникновение газожидкостного бугра под днищем маломерных плавсредств (гребные лодки, мотолодки), не обладающих достаточными мореходными качествами, может привести к их заливанию и / или опрокидыванию. Это означает, что решение об установке русловых водозаборников, оборудованных пневматической системой очистки фильтрующих элементов, должно сопровождаться анализом степени безопасности конструкции для маломерного судоходства.

**Ключевые слова:** водозаборник, газожидкостная струя, двухфазные течения, струя газа в жидкости, безопасность судоходства.

**Для цитирования:**

Афанасьев А. К. Исследование эффектов, возникающих в процессе пневматической очистки фильтрующих элементов русловых водозаборников / А. К. Афанасьев, М. П. Лебедева, Ю. В. Яцук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 158–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-158-169.

### Введение (Introduction)

В процессе эксплуатации русловых водозаборных сооружений происходит засорение сорудерживающих решёток и сеток водоприемных оголовков. Один из возможных способов борьбы с засорением заключается в продувке фильтрующих элементов водозаборников сжатым воздухом.

*Цель работы* заключается в оценке эффектов, возникающих вблизи поверхности воды в процессе продувки, с точки зрения безопасности судоходства на внутренних водных путях.

Вопросы, связанные с истечением газовых струй в жидкость, рассматриваются в ряде работ, в основном посвящённых проблемам безопасности морских газовых месторождений и морских газопроводов [1] – [3]. Как следует из рассмотренных публикаций, возможны три характерных режима выброса газовой струи в жидкость:

- медленное образование пузырей в месте выброса;
- непрерывное истечение газовой струи, которая распадается на отдельные пузыри непосредственно у места выброса;
- компактная струя газа, постепенно эжектирующая капли жидкости.

Воздушные пузыри, образовавшиеся после распада струи, всплывают вверх под действием силы Архимеда, увлекая за собой массы жидкости, что приводит к образованию на поверхности газожидкостного бугра. Увеличение высоты столба жидкости над местом выброса должно, с одной стороны, приводить к вовлечению в движение больших масс жидкости и увеличению высоты газожидкостного бугра, с другой — к уменьшению высоты бугра вследствие расширения струи.

Как следует из анализа, выполненного с использованием теории размерностей [4], основными критериями динамического подобия процесса истечения струй воздуха через слой жидкости являются числа Фруда, Рейнольдса и Вебера. Критерий подобия Фруда показывает соотношение сил инерции и сил тяжести, характеризует процесс волнообразования на поверхности. Критерий подобия Рейнольдса показывает соотношение сил инерции и сил трения, он определяет скорость движения пузырей в потоке. Критерий подобия Вебера показывает соотношение сил инерции и сил поверхностного натяжения, служит мерой увлечения жидкости за движущимися в ней пузырями.

Для обеспечения равенства чисел Фруда при истечении воздуха из натурного водозаборника и из его модели необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха у модели и натурной было равно масштабу в степени  $2^{1/2}$ :

$$\frac{Q_{M_n}}{\rho \delta_n^2 \sqrt{g \delta_n}} = \frac{Q_{M_m}}{\rho \delta_m^2 \sqrt{g \delta_m}}; \quad Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_n^2 \sqrt{\delta_n}}{\delta_m^2 \sqrt{\delta_m}} = Q_{M_m} S_c^{2/2}. \quad (1)$$

Для обеспечения равенства чисел Рейнольдса необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха было обратно пропорционально масштабу:

$$Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_m}{\delta_n} = \frac{Q_{M_m}}{S_c}. \quad (2)$$

Для обеспечения равенства чисел Вебера необходимо, чтобы отношение массовых расходов воздуха было равно масштабу в третьей степени:

$$Q_{M_n} = Q_{M_m} \frac{\delta_n^3}{\delta_m^3} = Q_{M_m} \cdot Sc^3. \quad (3)$$

Как следует из выражений (1) – (3), одновременное строгое соблюдение хотя бы двух критериев динамического подобия оказывается невозможным. В публикации [4] предлагается моделировать истечение газовых струй в жидкость по критерию Фруда, исходя из предположения о том, что процесс является автомодельным по числам Вебера и Рейнольдса, однако доказательств автомодельности не представлено. В связи с ранее изложенным, было принято решение осуществлять моделирование продувки водозаборника по числу Фруда, рассматривая полученные результаты как качественные. Для получения количественной оценки высоты газожидкостного бугра было решено смоделировать фрагмент водозаборника, состоящий из одного отверстия и проницаемой поверхности, что позволило обеспечить выполнение всех трёх критериев динамического подобия.

Продолжительность модельного эксперимента при исследовании работы макета должна рассчитываться с учётом критерия кинематического подобия — числа Струхала (St):

$$t_m = \frac{Q_{M_n} t_n \delta_m^3}{Q_{M_m} \delta_n^3} = \frac{t_n}{\sqrt{Sc}}. \quad (4)$$

Для решения поставленной задачи были проведены экспериментальные исследования в соответствии со следующей программой:

- испытания макета водозаборника на тихой воде с целью качественного исследования процесса в зависимости от расхода воздуха и заглубления макета. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над водозаборником  $H_{cm}$ , расход воздуха через водозаборник  $Q_{M_m}$ , высота  $H_{bm}$  и размеры в плане газожидкостного бугра в зависимости от расхода;
- исследование истечения одиночной струи из отверстия диаметром 6 мм при наличии проницаемой поверхности. Расход воздуха через отверстие соответствовал расходу воздуха, наблюдаемому в натурных условиях. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над отверстием  $H_{cm}$ , расход воздуха через отверстие  $Q_{M_m}$ , высота  $H_{bm}$  и размеры в плане газожидкостного бугра в зависимости от расхода;
- испытания макета водозаборника в присутствии внешнего течения с целью получения качественных данных о структуре газожидкостной струи в поперечном потоке и оценке высоты газожидкостного бугра в условиях течения. Измеряемые параметры: высота столба жидкости над водозаборником  $H_{cm}$ , расход воздуха через водозаборник  $Q_{M_m}$ , высота газожидкостного бугра  $H_{bm}$  при постоянном расходе;
- наблюдения за процессом продувки близкого по конструкции водозаборника, установленного в русле реки.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения исследований процесса продувки водозаборника в части определения характеристик газожидкостного бугра, образующегося на свободной поверхности акватории, была создана экспериментальная установка в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Опытный бассейн представляет из себя бетонную чашу длиной 120 м, шириной 6 м и глубиной 3,3 – 3 м.

Состав экспериментальной установки (рис. 1): компрессор 3, позволяющий обеспечивать давление сжатого воздуха в ресивере 4 до 750 кПа. Контроль давления сжатого воздуха в ресивере осуществлялся посредством образцового манометра МО-160 класса точности 0,4 с пределом измерения 1 МПа. Из ресивера сжатый воздух по воздушной магистрали 9 поступал в макет водозаборника 2. Измерение величины расхода производилось посредством измерительного комплекса 6, состоящего из трубки Вентури и дифференциального датчика давления ПД-11, а также цифрового

регистратора «Электрон» 10. Подключение к цифровому регистратору компьютера 11 позволило непрерывно регистрировать расход воздуха, поступающего в водозаборник. Расходно-напорные характеристики экспериментальной установки приведены на рис. 2.

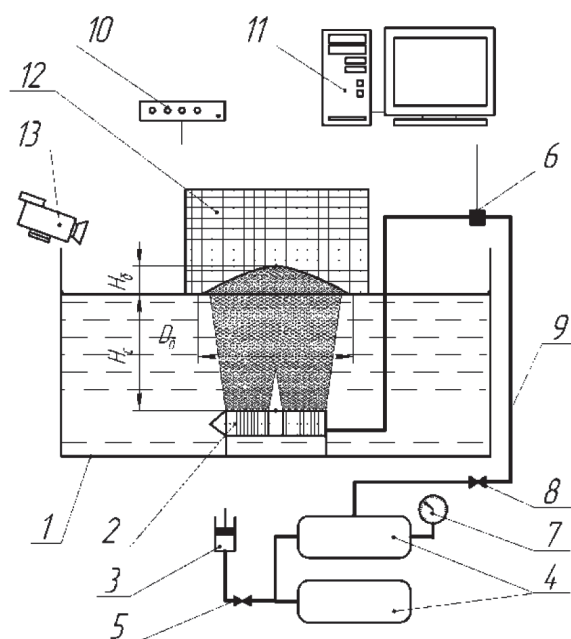


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — опытовый бассейн; 2 — макет водозаборника; 3 — компрессор; 4 — ресивер; 5 — вентиль; 6 — трубка Вентури с датчиком ПД-11; 7 — манометр; 8 — пусковой кран; 9 — воздуховод; 10 — электронный частотомер; 11 — компьютер; 12 — сетка; 13 — видеокамера

Определение геометрических характеристик газожидкостного бугра на свободной поверхности воды проводилось визуально при помощи «измерительной сетки» 12 с шагом ячеек в 1 см, а также обработки видеозаписей, полученных с помощью видеокамеры 13, регистрирующей вид свободной поверхности в месте образования газожидкостного бугра.

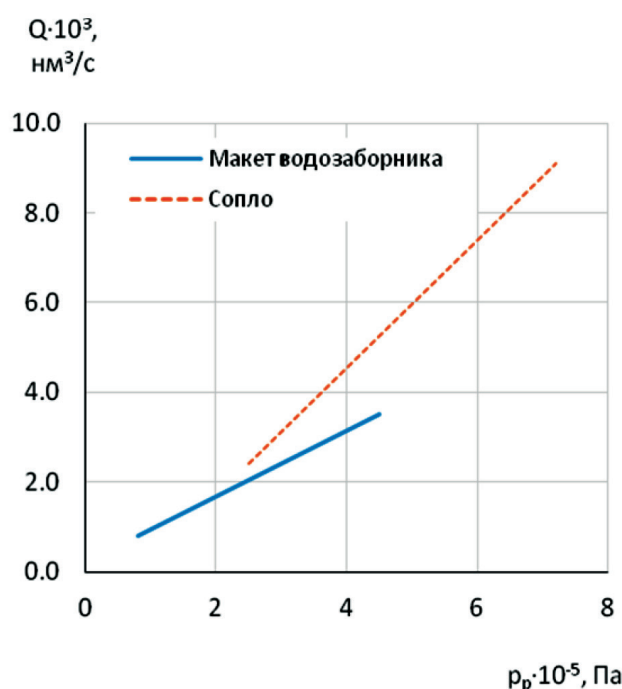


Рис. 2. Расходно-напорная характеристика экспериментальной установки

Для проведения испытаний в присутствии внешнего течения макет водозаборника устанавливался в гидродинамической лотке, имеющей длину 10 м, ширину 0,5 м и глубину 0,65 м. В лотке может быть создано течение со скоростью до 0,25 м/с.

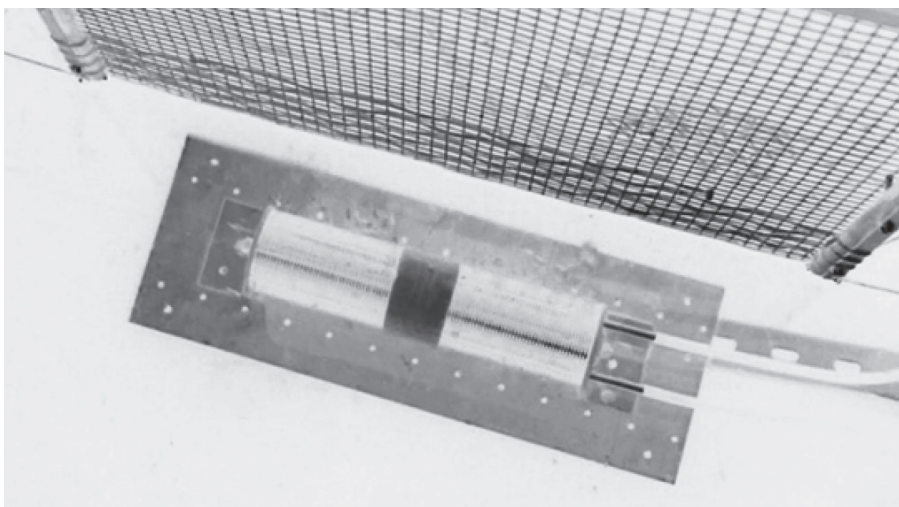


Рис. 3. Макет водозаборника

Исходя из технических возможностей лаборатории, было принято решение проводить испытания макетов № 1 и 2 реальных водозаборников, изготовленных в масштабе  $S_c = 20 \dots 23$ . Макеты водозаборников № 1 и 2 (рис. 3) представляли собой проницаемую конструкцию, выполненную в виде цилиндрической пружины. Зазор между витками образовывал щели, служащие проницаемой частью фильтра. Геометрические характеристики макетов водозаборников приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Параметры                         | Макет № 1 | Макет № 2 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Диаметр, мм                       | 85        | 75        |
| Длина рабочей части, мм           | 250       | 221       |
| Величина зазора между витками, мм | 0,2       | 1,5       |
| Ширина витка, м                   | 1,5       | 1,5       |
| Масштаб                           | 20        | 22,7      |

При исследовании истечения струи из отверстия диаметром 6 мм макет, состоящий из сопла и фрагмента фильтрующей поверхности, устанавливался на дне бассейна.

### Результаты (Results)

Испытания макетов водозаборников (рис. 4) в опытовом бассейне были проведены при заглублениях  $H_{cm}$  от 0,48 до 3 м. Расход воздуха  $Q$  изменялся в диапазоне от 0,001 до 0,0035 Н·м³/с. Высота газожидкостного бугра и его размеры в плане определялись путём обработки видеозаписей. Как следует из результатов испытаний, форма газожидкостного бугра в плане близка к окружности с диаметром, равным длине водозаборника.

В ходе работы было выполнено фотографирование для изучения процесса развития газожидкостной струи. Анализ полученных фотографий позволил установить, что средняя скорость движения пузырей в газожидкостной струе составляет 0,59 м/с. Полученный результат хорошо согласуется с данными о пузырьковых течениях, представленными в работе [5].



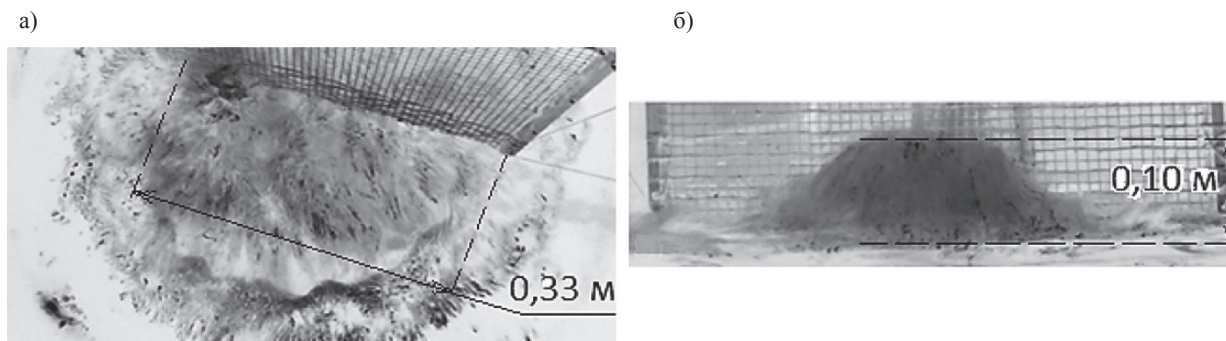


Рис. 4. Испытания макета водозаборника № 2 (глубина 0,48 м):  
а — вид сверху; б — вид сбоку

На рис. 5 представлены результаты измерения высоты газожидкостных бугров в зависимости от давления воздуха в ресивере и глубины. Как следует из рисунка, процесс продувки характеризуется высокой степенью неустойчивости. Зависимость результатов испытаний от глубины оказалась сравнительно слабой. В ходе испытаний было установлено, что выход воздуха из водозаборника в макете № 1 осуществляется не по всей поверхности, а лишь по «гребню» фильтрующего элемента. Однако на элементах газожидкостного бугра это обстоятельство практически не отразилось.

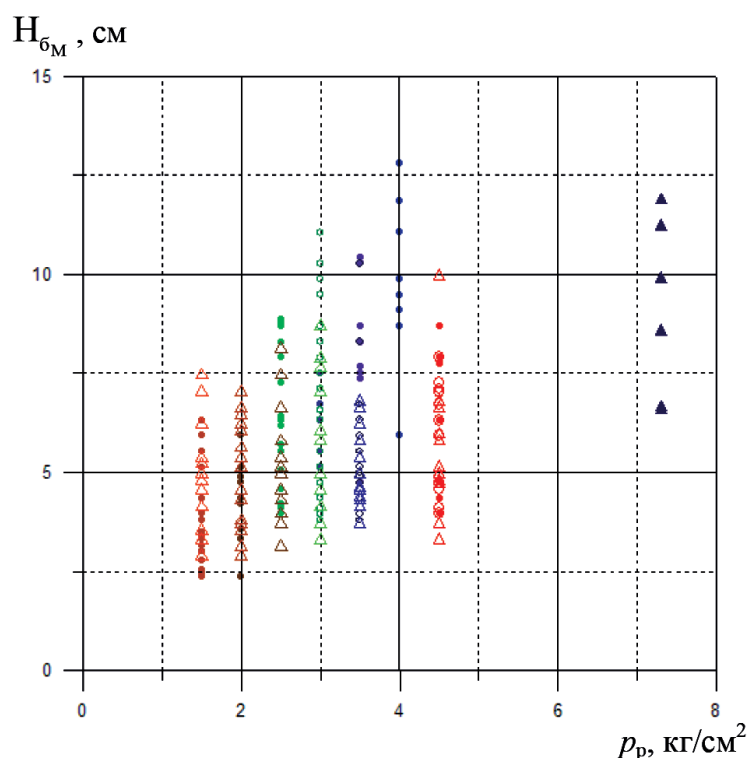


Рис. 5. Высоты газожидкостных бугров в зависимости от давления в ресивере  $p_p$  и глубины установки макета водозаборника под свободной поверхностью  $H_{бм}$   
Условные обозначения:  
• — глубина 3 м; о — глубина 2 м;  $\Delta$  — глубина 0,48 м

Следует отметить, что при прекращении подачи воздуха газожидкостный бугор практически сразу разрушается. Таким образом, можно ожидать, что время существования бугра в натуральных условиях будет близким к продолжительности продувки водозаборника воздухом.

При испытаниях сопла диаметром 6 мм расход воздуха  $Q$  изменялся от 0,01 нм<sup>3</sup>/с до 0,0025 нм<sup>3</sup>/с (для моделируемого натурального водозаборника максимальный расход воздуха через одно подающее отверстие составляет 0,004 нм<sup>3</sup>/с). Таким образом, режимы течения через сопло, достигнутые в ходе эксперимента, соответствуют натурным. В ходе испытаний осуществлялась как надводная, так и подводная видеосъемка (рис. 6).



Рис. 6. Испытания макета сопла (подводная съемка)

Как показала обработка видеозаписей, распад газовой струи на отдельные пузыри происходит в непосредственной близости от сопла, еще до контакта струи с фильтрующей поверхностью. Тенденции к последующему объединению пузырей не выявлено. Полученные результаты соответствуют данным, представленным в [4], [6], [7].

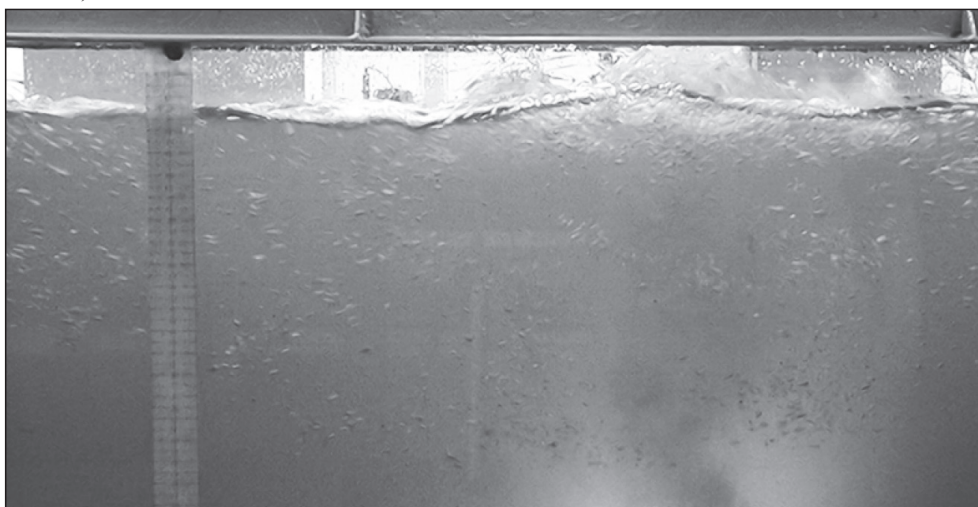
Обработка видеозаписей позволила установить, что объем газожидкостного бугра над одиночным соплом в отсутствие течения при расходе  $Q = 0,004$  нм<sup>3</sup>/с изменяется от 0,012 до 0,022 м<sup>3</sup>. Таким образом, объем газожидкостного бугра над натурным водозаборником (528 отверстий) будет изменяться от 6,3 м<sup>3</sup> до 12 м<sup>3</sup>.

При проведении испытаний в гидродинамическом лотке (рис. 7), во избежание переливания воды через край лотка, давление в ресивере поддерживалось равным 2 кг/см<sup>2</sup>. Испытания при отсутствии течения показали, что высота газожидкостного бугра соответствует измеренной в опытовом бассейне и, таким образом, ограниченность поперечного сечения лотка не отражается на результатах испытаний.

При проведении испытаний на течении со скоростью  $U = 0,25$  м/с было установлено, что высота газожидкостного бугра уменьшается ориентировочно до 60 % от высоты на спокойной воде, а угол волнового склона близок к углу склона ветровых волн. Скорость подъема пузырей, приближенно оцененная при испытании модели водозаборника в гидродинамическом лотке, составила  $V = 0,54$  м/с. Близкое значение (0,59 м/с) было зафиксировано при обработке видеозаписей, полученных при испытаниях в опытовом бассейне.

Исходя из предположения о том, что внешний поток не оказывает влияния на скорость всплытия пузырей, получим, что угол отклонения газожидкостной струи от вертикали должен составить  $\zeta = \arctg\left(\frac{U}{V}\right) = \arctg\left(\frac{0,25}{0,54}\right) \approx 25^\circ$ . Анализ видеозаписей показывает, что угол отклонения газожидкостной струи внешним потоком составляет ориентировочно 35°. Полученные результаты качественно соответствуют данным об отклонении струи внешним потоком, представленным в публикации [8].

а)



б)

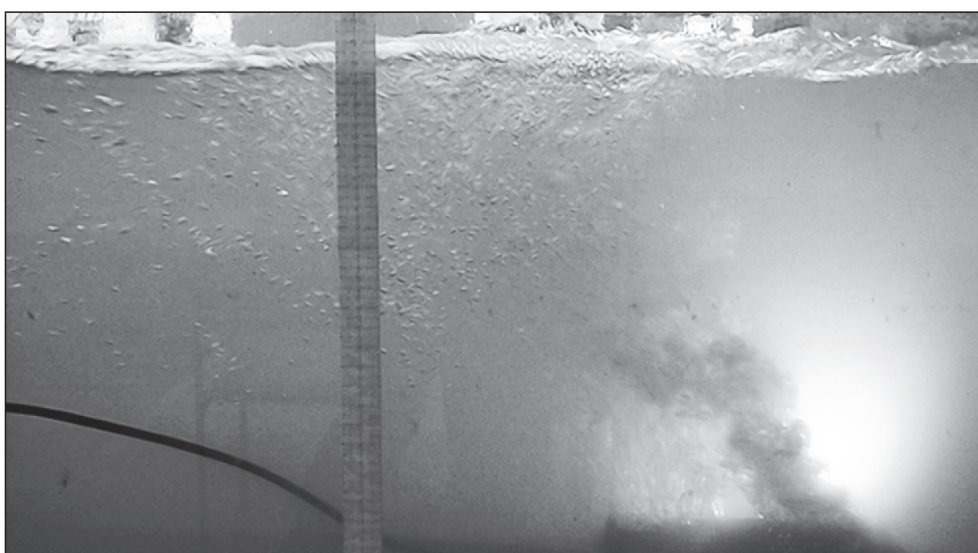


Рис. 7. Испытания макета № 2 в гидродинамическом лотке:  
а — без течения; б — на течении 0,25 м/с (направление течения: справа-налево)

На завершающем этапе исследований была выполнена видеозапись процесса продувки системы, состоящей из двух натуральных водозаборников, конструктивно аналогичных рассматриваемым. Натурная система была размещена вблизи берега реки, скорость течения в месте установки системы, по оценке авторов статьи (*прим. ред.*), составляет 0,2 – 0,25 м/с. Каждый водозаборник имеет диаметр 0,4 м и длину 2,5 м. В момент записи расстояние от поверхности воды до водозаборника составляло 1,8 м.

Как видно из представленных фотографий (рис. 8), в начальный момент поверхность воды над водозаборниками покрыта системой пузырей, образованных водно-воздушной смесью, имеющих сферическую форму. В дальнейшем наблюдается разрушение пузырей с образованием локальных выбросов водовоздушной смеси. Максимальная высота подъема водовоздушной смеси отмечается на первой секунде продувки и по оценкам авторов статьи (*прим. ред.*) может достигать 0,5 м. Этот выброс проявляется в виде изолированной струи малого диаметра. Через 1,5 с от начала продувки высота газожидкостного бугра снижается до 0,3 м и остается практически неизменной в последующие 6 с.



Рис. 8. Процесс продувки натуральных водозаборников:  
а — продувка одного водозаборника; б — продувка двух водозаборников

Список использованных в статье обозначений и пояснений к ним дан в табл. 2.

Таблица 2

| Обозначение                                      | Пояснение                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $D_6$                                            | Диаметр (условный) основания газожидкостного бугра на уровне свободной поверхности, м (Suppositive Diameter of Gas Liquid Bump on the free Water Surface Level, m) |
| $Fr = \frac{Q_m}{\rho \delta^2 \sqrt{g \delta}}$ | Число Фруда (Froude Number)                                                                                                                                        |
| $H_6$                                            | Высота газожидкостного бугра над невозмущенной поверхностью воды, м (Suppositive Height of Gas Liquid Bump over the Free Water Surface Level, m)                   |
| $H_c$                                            | Высота столба жидкости над оголовком, м (Distance from Water Intake to free Water Surface, m)                                                                      |
| $g$                                              | Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> (Acceleration of Gravity, m/s <sup>2</sup> )                                                                        |
| $p$                                              | давление, Па (Pressure, Pa)                                                                                                                                        |
| $Q$                                              | Объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям, нм <sup>3</sup> /с (Volumetric air Flow Rate at Atmospheric Pressure, nm <sup>3</sup> /s)              |
| $Q_m$                                            | Массовый расход воздуха, кг/с (Air Flow Rate, kG/s)                                                                                                                |
| $Re = \frac{\delta Q_m}{\mu_b}$                  | Число Рейнольдса (Reynolds Number)                                                                                                                                 |
| $S$                                              | Суммарная площадь отверстий, через которые осуществляется подача воздуха, м <sup>2</sup> (Total Area of Holes for air Supply in the Water Intake, m <sup>2</sup> ) |
| $S_c$                                            | Масштаб модели (Scale Factor)                                                                                                                                      |
| $St = \frac{Q_m t}{\rho_b \delta^3}$             | Число Струхала (Strouhal Number)                                                                                                                                   |



Таблица 2  
(Окончание)

|                                           |                                                                                                                                |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t$                                       | Время, с (time, s)                                                                                                             |
| $V$                                       | Скорость всплытия газожидкостной струи, м/с (Mean Speed of air Bubbles in Gas Liquid Jet, m/s);                                |
| $U$                                       | Скорость внешнего течения, м/с (Velocity of External Flow, m/s)                                                                |
| $We = \frac{Q_m}{\rho_B \delta^3 \sigma}$ | Число Вебера (Weber Number)                                                                                                    |
| $\delta = \sqrt{S}$                       | Гидравлический радиус, м (Hydraulic Radius, m)                                                                                 |
| $\mu$                                     | Динамическая вязкость воды, Па·с (Dynamic Viscosity of Water, Pa·s)                                                            |
| $\mu_B$                                   | Динамическая вязкость воздуха, Па·с (Dynamic Viscosity of Air, Pa·s)                                                           |
| $\rho$                                    | Плотность воды, кг/м <sup>3</sup> (Water Density, kG/m <sup>3</sup> )                                                          |
| $\rho_B$                                  | Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup> (Air Density, kG/m <sup>3</sup> )                                                         |
| $\sigma$                                  | Поверхностное натяжение между воздухом и водой, Дж/м <sup>2</sup> (Surface Tension Between air and Water, J / m <sup>2</sup> ) |
| $\zeta$                                   | Угол отклонения газожидкостной струи внешним потоком, ° (Angle of Deflection of a Gas Liquid jet by an External Flow, °)       |
| Индексы (subscripts):                     |                                                                                                                                |
| $m$                                       | модель (Model Scale);                                                                                                          |
| $n$                                       | натурный объект (Full Scale);                                                                                                  |
| $p$                                       | ресивер (Receiver)                                                                                                             |

### Обсуждение (Discussion)

Оценки, выполненные с использованием полученных экспериментальных данных, показывают, что высота газожидкостного бугра, возникающего при продувке водозаборника, установленного в акватории разряда «Р» [9] на глубине 10 м при скорости течения 1 – 2 м/с, не превысит 0,72 м, а угол волнового склона будет близок к углу волнового склона ветровых волн [10]. Основание бугра будет иметь форму, близкую к кругу радиусом 5 – 10 м. Бугор будет сноситься вниз по потоку относительно водозаборника на расстояние 20 – 30 м. Продолжительность существования бугра будет близка к продолжительности процесса продувки оголовка воздухом.

В ходе проведенных модельных испытаний было установлено, что струи воздуха, образующиеся в процессе продувки, будут распадаться на отдельные пузыри еще в пределах водозаборника. Тенденции к дальнейшему слиянию пузырей не выявлено. Таким образом, оснований опасаться возникновения внезапной просадки маломерного судна, оказавшегося в момент продувки над водозаборником, нет.

Поскольку расчетная высота волны для водных бассейнов разряда «Р» составляет 1,2 м [9], можно утверждать, что процесс продувки фильтра-оголовка будет безопасен для всех судов класса «Р» Российского Речного Регистра. Безопасность плавания маломерных судов, не состоящих под надзором Российского Речного Регистра, будет определяться степенью соответствия их мореходных качеств условиям плавания в рассматриваемом водном бассейне.

### Заключение (Conclusion)

Процесс очистки фильтрующих элементов русловых водозаборников с использованием сжатого воздуха приводит к появлению струйного течения, направленного вверх, и сопровождается



появлением на поверхности воды газожидкостного бугра. Размеры бугра в плане определяются габаритами водозаборника и могут достигать нескольких метров, а его высота сопоставима с высотой развитых ветровых волн или волн, создаваемых крупными быстроходными судами.

Выполненный анализ показывает, что для судов, длина которых превосходит диаметр бугра, а остойчивость соответствует требованиям нормативных документов, процесс продувки не будет представлять какой-либо опасности.

В то же время возникновение газожидкостного бугра под днищем маломерных плавсредств (гребные лодки, мотолодки), не обладающих достаточными мореходными качествами, может привести к их заливанию и/или опрокидыванию. Это означает, что решение об установке русловых водозаборников, оборудованных пневматической системой очистки фильтрующих элементов, должно сопровождаться анализом степени безопасности конструкции для маломерного судоходства.

*Авторы выражают благодарность коллективу Испытательного центра гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» за помощь в организации и проведении эксперимента в гидродинамическом лотке.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов В. С. Моделирование физических эффектов при аварийных разрывах подводных газопроводов / В. С. Сафонов, С. В. Ганага // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2013. — № 3 (14). — С. 212–219.
2. Максимов В. М. Некоторые проблемы экологической и промышленной безопасности природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики / В. М. Максимов, М. К. Тупысев, С. М. Пронюшкина, Л. Г. Кульпин // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 60–67.
3. Сафонов В. С. Методические аспекты анализа аварийных процессов на подводных газопроводах / В. С. Сафонов, А. В. Мельников, С. В. Ганага // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2015. — № 2 (22). — С. 155–163.
4. Иванников А. В. Экспериментальное исследование истечения газожидкостной струи через слой жидкости: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Иванников. — М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2007. — 141 с.
5. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. — М.: Мир, 1972. — 440 с.
6. Исаев В. И. Экспериментальная установка и методика исследования дебита газового фонтана по параметрам газо-водяного бугра на поверхности жидкости в кратере / В. И. Исаев // Сб. «Нефть и газ». — М., 1972. — С. 108–109.
7. Leifer I. Engineered and Natural Marine Seep, Bubble-Driven Buoyancy Flows / I. Leifer, H. Jeuthe, S. H. Gløsdund, V. Johansen // Journal of Physical Oceanography. — 2009. — Vol. 39. — Is. 12. — Pp. 3071–3090. DOI: 10.1175/2009JPO4135.1.
8. Masutani S. M. Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills / S. M. Masutani, E. E. Adams // Final Report. — Honolulu, Hawaii: University of Hawai'i, 2001. — 147 p.
9. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. — М.: Российский Речной Регистр, 2015.
10. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. — 768 с.

## REFERENCES

1. Safonov, V.S., and S.V. Ganaga. "Modelirovanie fizicheskikh effektov pri avariinykh razryvakh podvodnykh gazoprovodov." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoi nauki* 3(14) (2013): 212–219.
2. Maksimov, V.M., M.K. Tupysev, S.M. Pronyushkina, and L.G. Kulpin. "The Problems of Environmental and Industrial Safety of Natural and Man-Made Marine Facilities during Development of the Arctic Shelf." *Arctic: ecology and economy* 4(16) (2014): 60–67.
3. Safonov, V. S., A. V. Mel'nikov, and S. V. Ganaga. "Metodicheskie aspekty analiza avariinykh protsessov na podvodnykh gazo-provodakh." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoi nauki* 2(22) (2015): 155–163.

4. Ivannikov, A. V. Eksperimental'noe issledovanie istecheniya gazozhidkostnoi strui cherez sloi zhidkosti. PhD diss. M.: RGU нефти i gaza im. I.M. Gubkina, 2007.
5. Uollis, G. *Odnomernye dvukhfaznye techeniya*. M.: "Mir", 1972.
6. Isaev, V.I. "Eksperimental'naya ustanovka i metodika issledovaniya debita gazovogo fontana po parametram gazo-vodyanogo bugra na poverkhnosti zhidkosti v kratere." *Sbornik "Neft' i gaz"*. M., 1972: 108–109.
7. Leifer, Ira, H. Jeuthe, S. H. Gløsdund, and V. Johansen. "Engineered and natural marine seep, bubble-driven buoyancy flows." *Journal of Physical Oceanography* 39.12 (2009): 3071–3090. DOI: 10.1175/2009JPO4135.1
8. Masutani, Stephen M., and E. Eric Adams. "Experimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills." *Final Report*. Honolulu, Hawaii: University of Hawai'i, 2001.
9. *Rossiiskii Rechnoi Registr. Pravila (v 4-kh tomakh)*. M.: Rossiiskii Rechnoi Registr, 2015.
10. Voitkanskii, Ya.I., ed. *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli. L.: Sudostroenie, 1985.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Афанасьев Андрей Константинович —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова».  
198035, Российская федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [imp45@yandex.ru](mailto:imp45@yandex.ru), [kaf\\_texp@gumrf.ru](mailto:kaf_texp@gumrf.ru)

**Лебедева Марина Петровна —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова».  
198035, Российская федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [imp45@yandex.ru](mailto:imp45@yandex.ru), [LebedevaMP@gumrf.ru](mailto:LebedevaMP@gumrf.ru)

**Яцук Юрий Владимирович —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова».  
198035, Российская федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [iatsouk@yandex.ru](mailto:iatsouk@yandex.ru), [YatsukUV@gumrf.ru](mailto:YatsukUV@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Afanasev, Andrei K. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,  
198035, Russian Federation  
e-mail: [imp45@yandex.ru](mailto:imp45@yandex.ru), [kaf\\_texp@gumrf.ru](mailto:kaf_texp@gumrf.ru)

**Lebedeva, Marina P. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,  
198035, Russian Federation  
e-mail: [imp45@yandex.ru](mailto:imp45@yandex.ru), [LebedevaMP@gumrf.ru](mailto:LebedevaMP@gumrf.ru)

**Yatsuk, Yury V. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,  
198035, Russian Federation  
e-mail: [iatsouk@yandex.ru](mailto:iatsouk@yandex.ru), [YatsukUV@gumrf.ru](mailto:YatsukUV@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Received: January 15, 2018.

## THE PROBLEM OF HYDROMETEOROLOGICAL MAINTENANCE OF YEAR-ROUND NAVIGATION IN THE EAST SIBERIAN SEA

**A. Yu. Sharonov, V. A. Shmatkov**

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

*The consideration of the possibility of year-round navigation in the East Siberian Sea on the basis of taking into account the features of the formation and development of meteorological conditions for navigation and ensuring environmental safety in the Arctic zone of Russia. The characteristics of the research object are considered from the point of view of operational requirements for ice, temperature and other characteristics for ships operating in polar waters. The presented data of the main navigational characteristics, especially dangerous and dangerous ice cover allow to take into account a certain combination of these parameters as conditions determining the possibility or impossibility of navigation in a particular period of time. As an example, the characteristics of ice conditions in the East Siberian Sea at the end of the autumn-winter period (October-May) and summer-autumn (June-September) are given. The analysis of formation of ice conditions of navigation from 1999-2017 in August-September is given. Separately, the conditions of navigation in the area of predominance of old and most powerful and strong ice are considered. A brief review and analysis of the meteorological and ice regime of the East Siberian Sea is presented. The main attention is paid to the characteristics that have a significant impact on polar navigation: navigational characteristics of ice, low air temperatures, storm winds, rapidly changing weather conditions. The conditions of ice navigation during the period of ice growth in October-May and melting in July-September are given. The nature of navigation in Arctic waters is considered when three types of ice conditions are formed: light, medium and heavy. Thus, ensuring year-round navigation in the East Siberian Sea allows us to scientifically solve the operational problems and planning the flight, taking into account hydrometeorological factors.*

*Keywords: Polar navigation, hydrometeorological navigation support, hazardous weather conditions, risk level, wind, fog, sea level, ice conditions, types of ice conditions, speed in ice, icebreaker, ice operations headquarters, recommendations to the courts.*

**For citation:**

Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechno-go flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

**УДК 551.509**

## ЗАДАЧИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КРУГЛОГОДИЧНОЙ НАВИГАЦИИ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

**А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков**

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

*Основной темой статьи является рассмотрение возможности круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море на базе учета особенностей формирования и развития гидрометеорологических условий в целях навигации и обеспечения экологической безопасности в Арктической зоне России. Характеристики объекта исследования рассмотрены с точки зрения эксплуатационных требований по ледовому, температурному режиму и другим характеристикам для судов, работающих в полярных водах. Представленные данные основных навигационных характеристик, особо опасных и опасных условий ледяного покрова позволяют учитывать определенное сочетание этих параметров как условия, определяющие возможность или невозможность плавания в конкретный период времени. В качестве примера даны характеристики ледовых условий в Восточно-Сибирском море на конец осенне-зимнего периода (октябрь – май) и летне-осеннего (июнь – сентябрь). Дан анализ формирования ледовых условий плавания*

с 1999 – 2017 гг. в августе – сентябре. Отдельно рассмотрены условия плавания в районе преобладания старых и наиболее мощных и прочных льдов. Представлен краткий обзор и анализ метеорологического и ледового режима Восточно-Сибирского моря. Основное внимание уделено характеристикам, оказывающим существенное влияние на полярное судоходство: навигационные характеристики льда, низкие температуры воздуха, штормовые ветры, быстроменяющиеся погодные условия. Приведены условия ледового плавания в период нарастания льда в октябре – мае и таяния в июле – сентябре. Характер плавания в арктических водах рассматривается при формировании трех типов ледовых условий: легких, средних и тяжелых. Таким образом, обеспечение круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море позволяет научно обоснованно решать задачи оперативного характера и планирования рейса с учетом гидрометеорологических факторов.

**Ключевые слова:** полярное судоходство, гидрометеорологическое обеспечение навигации, опасные условия погоды, уровень риска, ветер, туман, уровень моря, ледовый режим, типы ледовых условий, скорость движения во льду, ледокольная проводка, штаб ледовых операций, рекомендации судам.

**Для цитирования:**

Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

### **Введение (Introduction)**

Полярное судоходство является обособленным видом деятельности в мировом судоходстве, поэтому знания и опыт в этом отношении доступны относительно малому кругу специалистов. Условия Арктики и Антарктики настолько суровы и специфичны по сравнению с обычными условиями мореплавания, что применение обычных стандартов к конструкции и оборудованию судна, его снабжению и экипажу в полярных водах создает неприемлемый уровень рисков, так как на первоначальном этапе решение будет приниматься лицами, не всегда обладающими достаточным опытом (судоводители, портовые диспетчеры и т. д.).

Ограничения, предусмотренные Полярным судовым свидетельством (Polar Ship Certificate) и Руководством по эксплуатации в полярных водах (Polar Water Operational Manual), не являются жесткими и не устанавливает конкретных территориально-временных ограничений, а условия мореплавания в одних и тех же районах полярных вод в разное время года разительно отличаются.

Изменения погоды, ледовой обстановки и температуры в полярных водах весьма неожиданны, часто непредсказуемы, а решения должны приниматься в отношении рейсов, которые длятся в течение недель и месяцев, на основе пока еще ненадежных прогнозов. В полярных водах нет или мало портов-убежищ, ограничена доступность спасательных служб, что не позволяет уменьшить последствия возможной ошибки.

С целью дополнения существующих инструментов ИМО для повышения безопасности эксплуатации судов и ограничения ее влияния на людей и окружающую среду в удаленных, уязвимых и потенциально отличающихся суровым климатом полярных водах, разработан Международный Полярный кодекс [1]. Этот документ рассматривает виды опасности, способные привести к повышению уровня риска как вследствие увеличения вероятности возникновения нежелательного события, так и вследствие возникновения более тяжелых его последствий либо и того и другого одновременно. Среди указанных опасностей необходимо отметить следующие:

1. Лед, поскольку он может оказывать влияние на конструкции корпуса, характеристики остойчивости, механические установки, плавание, условия работы на открытом воздухе, техническое обслуживание и готовность к чрезвычайным ситуациям, а также приводить к нарушению нормальной работы оборудования и систем безопасности.
2. Обледенение верхних конструкций, груза и т. п., имеющее результатом возможное снижение остойчивости и работоспособности оборудования.

3. Низкие температуры, поскольку они оказывают влияние на условия работы и работоспособность людей, на техническое обслуживание и готовность к чрезвычайным ситуациям, на свойства материалов и эффективность оборудования, время выживания и эксплуатационные показатели оборудования и систем безопасности.

4. Быстро изменяющиеся суровые погодные условия, потенциально приводящие к росту и развитию масштаба происшествий.

Уровень риска в полярных водах может быть различным в зависимости от географического района, времени года, а именно: уровня освещенности и количества льда и т. п. Таким образом, требуемые меры по ограничению последствий действия рисков, характерные для указанных выше отдельных видов опасности, могут варьироваться в пределах полярных вод и быть различными для акваторий Арктики и Антарктики. Прохождение трассы и работа судов в водах Российской Арктики должны быть безопасными для них и для экологии Арктики. Эти два аспекта ледовой навигации могут быть обеспечены хорошим знанием ледовых условий на трассе и способностью судна преодолевать льды без аварий. Для выполнения гидрографических работ необходимо иметь сведения о ледовых условиях не только на трассе перехода в район работ, но и на акватории самого района. Различие географического положения арктических морей обуславливает пространственную и временную неоднородность распределения льдов и метеорологических характеристик на их акваториях. Это определяет необходимость исследовать метеорологические и ледовые условия отдельно для каждого моря и по локальным районам одного и того же моря [2].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

*Метеорологические условия плавания.* Ветры в Восточно-Сибирском море формируются в зависимости от общей циркуляции атмосферы и ряда местных особенностей: на акватории моря — наличие и отсутствие морского дрейфующего льда, на суше — орография (описание) рельефа местности и т. п. В узких заливах, проливах, устьевых участках рек особенно с высокими берегами ветры дуют вдоль берегов. Скорость ветра в открытом море составляет в среднем 4 – 6 м/с. Летом скорость ветра больше, чем зимой [3], [4]. Повторяемость ветра скоростью 15 м/с и более в открытом море и на большей части побережья относительно невелика. Количество дней со штормовым ветром больше 20 м/с в отдельных пунктах может составлять 45, 48 и даже 65 дней в году, достигая при этом скорости сильных штормов 20 – 28 м/с, а зимой жестоких штормов и ураганов — 30 – 35 м/с. В морском порту Певек возможна скорость ветра 40 м/с и более в течение отдельных периодов года из-за местных особенностей.

Число дней со штормом на побережье Восточно-Сибирского моря изменяется в больших пределах (от 15 до 50 за год) в зависимости от особенностей положения станций, но в целом увеличивается с запада на восток. Реже всего штормовые ветры отмечаются на станциях о. Жохова (14 дней), р. Алазея (16 дней), о. Айон (20 дней). Наиболее часто сильные ветры фиксировались в бухте Амбарчик (48 дней за год) и в Певеке (более 60 дней), т. е. на станциях с резко выраженным воздействием орографии на ветровой режим.

Из местных ветров особого внимания заслуживает «южак» в бухте Певек — сильный, порывистый юго-восточный ветер, сопровождаемый фёновыми явлениями. «Южак» возникает внезапно, скорость его часто достигает ураганных значений (40 – 45 м/с). Зона действия «южака» не превышает нескольких километров по ширине, в море его влияние простирается на несколько десятков километров. Штормовые ветры фёнового характера наблюдаются также в бухте Амбарчик и на мысе Шелагский.

Средние скорости ветра над акваторией Восточно-Сибирского моря от сезона к сезону меняются незначительно, их годовая амплитуда не превышает 2 м/с. Максимальные скорости ветра, измеренные на полярных станциях в Восточно-Сибирском море, почти повсеместно достигают 40 м/с. Летом они обычно не превышают 22 – 24 м/с в западной части моря и 28 – 32 м/с в вос-



точной. Аналогично и в переходные сезоны величины максимальных скоростей ветра возрастают с запада на восток.

При благоприятных условиях ледового плавания, когда ледовитость моря невелика, угрозу для плавания многих судов на фоне сильного ветра, забрызгивания и заливания корпуса судна при отрицательных температурах воздуха представляет их обледенение. Наиболее часто это явление наблюдается во второй половине сентября и начале октября. В арктических морях встречается три типа обледенения:

- морское обледенение — намерзание льда на корпусе судна вследствие забрызгивания и заливания его поверхности забортной водой;
- атмосферное обледенение — отложение льда на корпусе судна и надстройках, обусловленное замерзанием капель дождя, мороси, тумана или примерзанием мокрого снега;
- смешанное обледенение — примерзание смоченного забортной водой снега, а также сочетание морского и атмосферного обледенений.

Скорость нарастания льда при том или ином типе обледенения зависит от гидрометеорологических условий. Установлены следующие градации обледенения [5].

*Медленное обледенение* — на корпусе судна в течение одного часа образуется до 1,5 т льда. Происходит при температуре воздуха от 0 °С до –3,0 °С и любой скорости ветра.

*Быстрое обледенение* — масса льда на корпусе судна за один час может достичь 4,0 т. Наблюдается при температуре воздуха от –3,0 до –8,0 °С и скорости ветра 7 – 15 м/с.

*Очень быстрое обледенение* — в течение часа на корпусе судна образуется более 4 т льда. Отмечается при температуре воздуха ниже –8,0 °С и скорости ветра более 15 м/с.

В течение всего года плавание может осложняться ограниченной видимостью [6]. В светлое время года опасной для мореплавания является видимость менее 1 мили. Основными атмосферными явлениями, которые ухудшают видимость в рассматриваемом районе, являются туманы и метели.

Зимой ухудшение видимости чаще связано с метелями. При туманах видимость составляет менее 1000 м. В рассматриваемом районе за год отмечается 70 – 80 дней с туманами. Продолжительность туманов отмечается от 30 мин до нескольких суток. Зимой туманы наблюдаются редко — не более одного-двух дней. В основном это слабые и непродолжительные туманы. Туманы с низкими значениями видимости и продолжительные по времени образуются вблизи кромки льда и над открытыми полыньями. В мае месяце число дней с туманами может возрастать до 6 – 10 дней, в июле – августе — до 19, а в отдельные годы до 26 дней. К сентябрю их число начинает снижаться до 5 – 10 дней. В прибрежной зоне часто наблюдаются *адвективные туманы*. Осенью нередко отмечаются *туманы испарения* [7].

На мелководных акваториях моря опасность для судов представляют сгонно-нагонные колебания уровня, например, в проливах Санникова и Дмитрия Лаптевых, а также в устьевых участках р. Индигирка и Колыма.

Пространственное распределение температуры воздуха над Восточно-Сибирским морем резко меняется от сезона к сезону. Зимой, с ноября по март, на полях температуры сказывается адвекция тепла в тихоокеанских циклонах. Летом основным климатообразующим фактором становится приток солнечной радиации в условиях полярного дня.

Дополнительный комплекс требований Полярного кодекса относительно длительной эксплуатации судов в условиях низких температур содержит градацию базовых значений расчетных внешних температур, базовые значения которых охватывают наиболее типичные районы эксплуатации судов в условиях сурового климата [1]. В годовом ходе температуры воздуха отмечается один минимум (в конце зимы – февраль – март) и один максимум — в конце лета (август – сентябрь). В зимние месяцы на температуру воздуха оказывает влияние близость полюса холода (Оймякон). Самым теплым районом моря является его юго-восточная часть, куда через Чукотское море поступает более теплый воздух с Тихого океана. Большую часть года над Восточно-Сибирским морем наблюдаются отрицательные температуры.

Продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами составляет менее 2 мес. в северной части моря и 3 – 3,5 мес. — в южной. Устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С в сторону ее повышения раньше всего (конец мая) происходит в Чаунской губе и устьевой части р. Колыма, и лишь полтора месяца спустя (10 – 15 июля) в северо-восточной части моря. Осенний переход температуры воздуха через 0 °С в сторону ее понижения в северо-восточной части моря происходит уже в конце июля, а к 15 сентября вся акватория Восточно-Сибирского моря находится в области устойчивых отрицательных температур воздуха. Минимальные температуры воздуха могут составлять в зимние месяцы от –40 – –42 °С вблизи о. Врангеля, до –45 – –48 °С в прибрежной части моря. Летом над большей частью акватории ежегодно можно ожидать понижения температуры воздуха до 0 °С. Аналогично средине из абсолютных максимумов значений составляют летом над открытым морем 10 – 15 °С, у побережья до 20 – 25 °С. [7] – [9].

Температура воздуха в Арктике тесно связана с ветровым режимом. Зимой в прибрежных районах ветры, дующие с охлажденного континента, как правило, на несколько градусов холоднее, чем ветры, дующие со стороны моря. Самые сильные морозы зимой чаще всего отмечаются в бухтах и заливах при штилевой погоде. Связь термического режима с облачностью проявляется в уменьшении междусуточной изменчивости температуры в пасмурную погоду, сглаживании пространственных температурных контрастов. При ясной погоде амплитуда суточных колебаний температуры возрастает в несколько раз.

### Результаты (Results)

**Краткая характеристика ледового режима.** С октября по май – июнь море полностью покрыто льдом. Устойчивое ледообразование начинается на северной границе моря в конце августа, а в первой декаде октября в прибрежной зоне моря образуется молодой лед.

Припай Восточно-Сибирского моря является самым обширным в арктических морях России. В западной мелководной части его граница в марте находится около северного побережья Новосибирских островов на расстоянии 50 – 80 км. В районе р. Индигирка его ширина составляет 285 км. В восточной части моря ширина припая не превышает 30 км.

*Осенне-зимний период.* Отличие плавания судна во льдах и по чистой воде заключается в том, что во льдах судно преодолевает ледовое сопротивление (ломку, переворачивание, притапливание и раздвигание льдин, сопротивление при трении и ударах корпуса о льдины и др.), которое значительно больше, чем сопротивление чистой воды. Величина полного ледового сопротивления зависит от характеристик и состояния ледяного покрова. Основными навигационными характеристиками ледяного покрова являются: концентрация (сплоченность), стадия развития (толщина), формы льда (размеры льдин), торосистость, разрушенность, прочность, высота снега на льду.

Изменение значений каждого из перечисленных параметров приводит к изменению состояния ледяного покрова. При определенном сочетании этих параметров в ледяном покрове создаются условия, опасные для судоходства. Опасность для судоходства могут представлять и такие ледяные образования, как айсберги и куски айсбергов, несяки, стамухи, зоны набивного льда, сильно заторошенные поля многолетнего льда, ледяные острова и их куски (толщина 30 – 60 м).

Для навигационной характеристики ледовых условий в Восточно-Сибирском море использованы параметры ледяного покрова на конец осенне-зимнего периода (в мае). В этом месяце ледяной покров окончательно формируется и достигает своих предельных значений. Показателем ледовых условий в летне-осенний период может служить площадь районов моря, освобождающаяся ото льда в период таяния. Характерными месяцами являются август и сентябрь [10] – [12].

Возрастной состав льда в осенне-зимний период в западной и восточной части моря показан в табл. 1.

Таблица 1

**Возрастной состав льда в осенне-зимний период, %**

| Возраст льда              | Месяцы |    |    | Толщина<br>ледяного<br>покрова, м | Торосистость,<br>баллы | Толщина<br>двухлетних и<br>многолетних<br>полей, м |
|---------------------------|--------|----|----|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|
|                           | X      | П  | V  |                                   |                        |                                                    |
| Западная часть моря       |        |    |    |                                   |                        |                                                    |
| Молодой лед               | 64     | 5  | 4  | —                                 | —                      |                                                    |
| Однолетний тонкий         | 4      | 3  | 2  | —                                 | —                      |                                                    |
| Однолетний средний        | 5      | 17 | 2  | —                                 | —                      |                                                    |
| Однолетний толстый        | 0      | 60 | 80 | 1,8 – 2,0                         | 2 – 3                  |                                                    |
| Двухлетний<br>многолетний | 17     | 15 | 12 | —                                 | —                      | 3 – 4                                              |
| Восточная часть моря      |        |    |    |                                   |                        |                                                    |
| Молодой лед               | 47     | 2  | 2  |                                   |                        |                                                    |
| Однолетний тонкий         | 8      | 2  | 1  |                                   |                        |                                                    |
| Однолетний средний        | 6      | 10 | 2  |                                   |                        |                                                    |
| Однолетний толстый        | 0      | 54 | 65 | 1,8 – 2,0                         | 3 – 4                  |                                                    |
| Двухлетний<br>многолетний | 30     | 32 | 30 | —                                 | —                      | 3 – 4                                              |

Разрушение ледяного покрова начинается в июле и продолжается до конца октября. Процесс очищения моря ото льда завершается в сентябре. Количество сплоченных льдов 7 – 10 / 10 на конец июля составляет 76 %, разреженных (1 – 6 / 10) — 13%, на конец августа — 45 и 23 %, на конец сентября — 36 и 21 % соответственно. Количество сплоченных льдов 7 – 10 / 10 в Восточно-Сибирском море в конце сентября составляет 36 %.

*Ледяные массивы.* Скопления сплоченных льдов образуют два ледяных массива: Новосибирский в западной части и Айонский в восточной части. Новосибирский состоит из припайных льдов местного образования и может исчезнуть в любую из декад, начиная с 3 декады июля. Айонский ледяной массив является самым мощным в арктических морях. Он формируется из местных однолетних льдов различного возраста и многолетних льдов, поступающих из Арктического бассейна. Толщина однолетних льдов составляет 1,85 – 1,90, двухлетних и многолетних — 3 – 4 м, торосистость ледяного покрова — 6 – 8 / 10. Лды Айонского массива исчезают полностью редко.

К северу от Восточно-Сибирского моря проходит участок традиционной высокоширотной трассы Северного морского пути. Ледовые условия плавания на данном участке, из-за преобладания старых наиболее мощных и прочных льдов и повышенной протяженности сплоченных льдов, являются наиболее трудными.

На протяжении всего навигационного периода в восточной части Восточно-Сибирского моря по сравнению с другими морями формируются самые неблагоприятные условия плавания.

*Вторжение труднопроходимых льдов на трассы плавания.* При развитии ледовых условий по неблагоприятному типу на трассах плавания могут формироваться тяжелые или экстремальные (очень тяжелые) условия плавания. Сами по себе тяжелые ледовые условия не являются аномальными или опасными для плавания. Такие ситуации на судоходных трассах наблюдаются, как правило, в июле. Затем происходит резкое улучшение ледовых условий плавания [13].

Опасными являются случаи, когда ледовая обстановка осложняется очень быстро в течение от двенадцати часов до нескольких суток и не может быть спрогнозирована заранее. Это происхо-

дит в результате выноса на трассы плавания тяжелых сплоченных льдов со сжатием. Такие ситуации называются *обвалом сплоченных льдов на трассе плавания*. Суда попадают в ледовый плен, и их самостоятельное плавание становится невозможным.

Среднемесячная повторяемость (%) случаев обвалов сплоченных льдов 9 – 10 / 10 [9] на трассах показана в табл. 2.

Таблица 2

**Среднемесячная повторяемость (%) случаев обвалов сплоченных льдов 9 – 10 баллов на трассах за период 1942 – 2009 гг.**

| Район моря                      | Июль | Август | Сентябрь |
|---------------------------------|------|--------|----------|
| Запад Восточно-Сибирского моря  | 0    | 1      | 1        |
| Восток Восточно-Сибирского моря | 0    | 5      | 6        |

В западной части моря судоходные трассы оказываются заблокированными льдом в районе Новосибирских островов. В восточной части тяжелые льды Айонского ледяного массива в результате интенсивного южного дрейфа смещаются к Чукотскому побережью, перекрывая пути плавания.

*Сжатие ледяного покрова.* Главной причиной сжатия в районах судоходства является ветер. Вероятность появления сжатий зависит от скорости и направления ветра. При этом основную роль играют скорость и продолжительность действия ветра. Так, при скорости ветра 6 – 10 м/с и продолжительности его действия 18 ч, вероятность образования сжатия составляет 1,0 при скорости 11 м/с и более уже после 12 ч независимо от направления.

Сжатие льдов считается одним из наиболее опасных ледовых явлений, которые чаще всего являются причиной вынужденного дрейфа и даже гибели судов. Степень сжатия, площадь его распространения продолжительность действия зависят от причин, его вызывающих (ветер, течения и др.), и свойств самого льда (толщина, торосистость). Большое значение имеют также препятствия на пути дрейфа льда: берега, острова, стамухи и припай.

*Условия ледового плавания.* Формирование ледяного покрова в арктических морях можно разделить на два периода: нарастание льда в октябре – мае и таяние льда в июне – сентябре. В отдельные годы в зависимости от развития гидрометеорологических процессов границы указанных периодов могут сдвигаться.

В течение первого периода акватории арктических морей покрыты льдами различного возраста и толщины, что при любом развитии гидрометеорологических условий требует ледокольного обеспечения. Мощность энергетической установки ледокола в этот период должна обеспечивать ему ледопроездимость примерно 2,5 м, а с учетом необходимости преодоления участков торосистого и многолетнего льда — максимум примерно 3,5 м. Эта оценка дана при условии, что ледоколу требуется обеспечить непрерывное движение транспортных судов по трассе.

В течение второго периода акватории арктических морей постепенно освобождаются ото льда. Сроки начала летней навигации традиционно определялись в зависимости от времени начала таяния льда и взлома припая, сроки окончания навигации — временем наступления осенних ледовых явлений. В летний период протяженность участков сплоченного льда сокращается, а в результате таяния и разрушения снижается его прочность. Это позволяет существенно уменьшить мощность ледоколов, обеспечивающих плавание судов в летний период. С учетом прочности льда требуемая ледопроездимость ледокола может составлять 1,4 – 1,6 м.

**Обсуждение.** При анализе судоходства в арктических морях необходимо учитывать тенденции многолетних изменений ледовых условий на СМП. В отдельные годы в Арктике форми-

руются очень сложные ледовые условия (аномально тяжелые). В эти годы вся прибрежная трасса от Карских ворот до Берингова пролива покрыта сплошным льдом, припай разрушается только в середине августа, а новый процесс ледообразования начинается уже в первой декаде сентября. Проводка транспортных судов ледоколами затруднена. Нередко даже мощные атомные ледоколы испытывают большие затруднения при проходе в тяжелых многолетних льдах. Часто происходит их «заклинивание», возникает необходимость постоянного окалывания проводимых судов. В таких условиях возникают аварийные ситуации и даже гибель судов.

Формируются и аномально легкие ледовые условия. В годы с аномально легкими ледовыми условиями взлом припая происходит в конце июня, а в конце июля возможно безледокольное плавание. Арктические моря почти полностью освобождаются ото льда, а ледообразование начинается лишь в конце сентября. Продолжительность безледокольного плавания при таких условиях составляет 80 – 120 сут.

В качестве примера ледовых условий приведем следующие значения ледовитости в августе за период 1990 – 2017 гг.:

- минимальное значение — 27.12.2008 — 94,7;
- максимальное значение — 21.08.1996 — 1974,7;
- среднее значение — 1050,1.

В результате многолетнего опыта гидрометеорологического обеспечения навигации на трассе СМП учеными ААНИИ выделено три типа ледовых условий, которые определяют характер плавания в арктических морях, а именно: самостоятельное плавание или под проводкой ледокола — это легкие, средние и тяжелые условия. В табл. 3 представлена количественная оценка типов ледовых условий за период с 1990 по 2005 гг. [14] – [16].

Таблица 3

Типы ледовых условий в период 1990 – 2005 гг.

| Месяц    | Часть моря          |   |        |                 |   |        |
|----------|---------------------|---|--------|-----------------|---|--------|
|          | западная часть      |   |        | восточная часть |   |        |
|          | тип ледовых условий |   |        |                 |   |        |
| Июль     | Л и ОЛ              | С | Т и ОТ | Л и ОЛ          | С | Т и ОТ |
|          | 5                   | 3 | 8      | 8               | 2 | 6      |
| Август   | 9                   | 3 | 4      | 8               | 1 | 7      |
| Сентябрь | 12                  | - | 3      | 9               | - | 6      |

Условные обозначения: Л и ОЛ — легкие и очень легкие ледовые условия; С — средние; Т и ОТ — тяжелые и очень тяжелые.

В период 2008 – 2017 гг. в августе и сентябре тяжелые и очень тяжелые условия наблюдались только в августе на высокоширотной трассе в течение трех лет: 2008, 2013, 2014 гг., остальные годы были средними и легкими.

Критерии допуска судов на Северный морской путь в соответствии с их ледовым классом указаны в «Правилах плавания в акватории Северного пути» [17] – [19]. Для судов различных ледовых классов эти критерии приведены в табл. 4 – 6.

В табл. 4 – 6 приняты следующие условные обозначения:

СП — самостоятельное плавание;

ПЛ — плавание под проводкой ледокола;

Т — тяжелые ледовые условия в соответствии с официальной информацией Росгидромета;

С — средние ледовые условия в соответствии с официальной информацией Росгидромета;

Л — легкие ледовые условия в соответствии с официальной информацией Росгидромета;



+ — плавание судна разрешено;  
 – — плавание судна запрещено.

Таблица 4

**Для судов без ледовых усиления и с ледовым классом Ice1 – Ice3  
 в период навигации с июля по 15 ноября\***

| Ледовый класс судна | Способ ледового плавания | Восточно-Сибирское море |                        |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
|                     |                          | юго-западная часть      | северо-восточная часть |
|                     |                          | Т С Л                   | Т С Л                  |
| Нет**               | СП***                    | ---                     | ---                    |
|                     | ПЛ                       | --+                     | --+                    |
| Ice1                | СП                       | --+                     | --+                    |
|                     | ПЛ                       | --+                     | --+                    |
| Ice2                | СП                       | --+                     | --+                    |
|                     | ПЛ                       | --+                     | --+                    |
| Ice3                | СП                       | --+                     | --+                    |
|                     | ПЛ                       | --+                     | --+                    |

\* Для судов без ледовых усиления и с ледовым классом Ice1 – Ice3 плавание в акватории Северного морского пути с 16 ноября по 31 декабря и с января по июнь запрещено.

\*\* Нефтяные танкеры, газовозы, химовозы валовой вместимостью 10 000 и более, не имеющие ледовых усиления, могут осуществлять плавание в акватории Северного морского пути только по чистой воде в сопровождении ледокола в период с июля по 15 ноября.

\*\*\* Судам без ледовых усиления, за исключением нефтяных танкеров, газовозов, химовозов валовой вместимостью 10 000 и более, разрешено самостоятельное плавание в акватории Северного морского пути только по чистой воде.

Таблица 5

**Для судов с ледовым классом Arc4 – Arc9  
 в период навигации с июля по ноябрь**

| Ледовый класс судна | Способ ледового плавания | Восточно-Сибирское море |                        |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
|                     |                          | юго-западная часть      | северо-восточная часть |
|                     |                          | Т С Л                   | Т С Л                  |
| Arc4                | СП                       | --+                     | --+                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc5                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc6                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc7                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc8                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc9                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |

Таблица 6

Для судов с ледовым классом Arc4 – Arc9 в период навигации  
с января по июнь и в декабре

| Ледовый класс судна | Способ ледового плавания | Восточно-Сибирское море |                        |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
|                     |                          | юго-западная часть      | северо-восточная часть |
|                     |                          | Т С Л                   | Т С Л                  |
| Arc4                | СП                       | -- +                    | -- +                   |
|                     | ПЛ                       | -- +                    | -- +                   |
| Arc5                | СП                       | -- +                    | -- +                   |
|                     | ПЛ                       | -- +                    | -- +                   |
| Arc6                | СП                       | -- +                    | -- +                   |
|                     | ПЛ                       | -- +                    | -- +                   |
| Arc7                | СП                       | -- +                    | -- +                   |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc8                | СП                       | -++                     | -++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |
| Arc9                | СП                       | +++                     | +++                    |
|                     | ПЛ                       | +++                     | +++                    |

Примечания к табл. 4 – 6: 1. Для ледоколов с ледовым классом Icebreaker9 ограничения по самостоятельному плаванию в акватории Северного морского пути отсутствуют. 2. Для ледоколов с ледовым классом Icebreaker6 – Icebreaker8 в период навигации с июля по ноябрь разрешено самостоятельное плавание.

В настоящее время вывоз нефти с платформы «Приразломная» обеспечивают нефтеналивные танкеры ледового класса Arc6 «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров». Осенью 2016 г. «Совкомфлот» начал вывоз нефти с Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения танкерами ледового класса Arc7 «Штурман Альбанов», «Штурман Малыгин» и «Штурман Овцев». Для вывоза сжиженного газа для «Ямал-СПГ» в Корею заказано строительство танкеров-газовозов Arc7. Первый из этой серии газовоз «Кристоф Де Маржери» построен и прошел успешные испытания в Карском море. Во льду толщиной 1,5 м, двигаясь кормой вперед, он развивал скорость 6,2 уз. Успешно преодолел торос высотой 4,5 м и подводной частью (килем) — 12 – 15 м. Первый коммерческий рейс из Хаммерфеста в Норвегии до порта Порён (Южная Корея) по СМП продолжался 22 дня и завершился 12 августа 2017 г. Попутно был установлен новый рекорд прохождения по СМП — 6,5 сут.

Для судов с ледовым классом Arc6 в период навигации с января по июнь и в декабре разрешено самостоятельное плавание и под проводкой ледокола при легком типе ледовых условий (табл. 7). С июля по ноябрь разрешено плавание при любом типе ледовых условий (см. табл. 5).

Для судов с ледовым классом Arc7 с января по июнь и в декабре самостоятельное плавание разрешено при легком типе ледовых условий и плавание под проводкой ледокола при любом типе ледовых условий (см. табл. 7). С июля по ноябрь разрешено плавание при любом типе ледовых условий самостоятельно и под проводкой ледокола (см. табл. 6).

Скорость движения судна во льду зависит не только от толщины льда. Установлено, что при неудовлетворительной видимости скорость движения ледокола в автономном режиме уменьшается в среднем на 10 %, а при проводке транспортных судов — на 15 %. Значительное влияние на скорость движения во льдах оказывает снежный покров. При высоте снежного покрова больше 10 – 12 см снег на льду учитывается как добавочный слой льда, равный высоте снежного

покрова. Существенно влияют на снижение технических ледовых скоростей судов и караванов сжатие льда.

Рассмотрим возможность прохода танкера-газовоза Восточно-Сибирским морем зимой. В соответствии со своим ледовым классом газовоз способен преодолевать лед толщиной 1,8 м, но это при скорости движения 1,5 – 2 уз и при максимальном расходе топлива, которое требуется для обеспечения максимальной мощности. Уже в феврале в море устанавливаются очень тяжелые условия плавания. В западной части толщина льда 1,8 – 2,0 м занимает 60 % площади, 15 % — двухлетние и многолетние льды с толщиной льда в ледяных полях 3 – 4 м. В восточной части 54 % и 32 % соответственно (см. табл. 1 и 2). Торосистость составляет 6 – 8/10. Климат Восточно-Сибирского моря крайне неустойчив, прогнозировать формирование сжатий или их исчезновение очень сложно. С практической точки зрения гарантированное плавание возможно только при наличии ледокольной проводки. И даже в этом случае рассчитать количество времени, которое потребуется для преодоления участка трасс СМП в море, практически невозможно. С экономической точки зрения осуществлять такие рейсы нецелесообразно. В настоящее время все рейсы в восточном направлении по трассам СМП заканчиваются обычно в ноябре, а начинаются в конце июня. По мнению руководства «Совкомфлота», которое основано на большом опыте работы в этом регионе, проход в восточном направлении такого судна как «Кристофер Де Маржері»: «...возможен как эксперимент, но в целесообразности его использования в качестве регулярного маршрута у нас есть очень серьезные сомнения...» (kommersant.ru>doc3256943). Однако появление судов такого класса может несколько увеличить период работы на трассах.

### Заключение (Conclusion)

Обеспечение круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море может быть гарантировано введением в строй атомных ледоколов нового поколения, строительством специализированных судов с ледовым усилением, в том числе специальных газовозов (СПГ-танкеров) и восстановлением надежного гидрометеорологического обеспечения любых операций в акватории моря.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 232 с.
2. Атлас Арктики. — М.: ГУГК, 1985. — 204 с.
3. Брызгин Н. Н. Опасные метеорологические явления в Российской Арктике / Н. Н. Брызгин, А. А. Дементьев. — СПб.: Гидрометеиздат, 1996. — 156 с.
4. Климат России. — СПб.: Гидрометеиздат, 2004. — 196 с.
5. Бенземен В. Ю. Арктическая транспортная система: краткая история и перспективы развития / В. Ю. Бенземен, В. Н. Комендантов, В. А. Шматков. — СПб.: ООО «Бланк издательство», 2004. — 94 с.
6. Глухов В. Г. Детализация параметров опасных для мореплавания явлений погоды / В. Г. Глухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2. — С. 27–28.
7. Лочия Восточно-Сибирского моря. — СПб.: ГУНИО, 1988. — 207 с.
8. Справочник по опасным гидрометеорологическим и ледовым явлениям на трассах Северного морского пути // Интернет-портал ЕСИМО. — 2009 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.aari.ru/resources/a0011\\_12/manual\\_op/content.html](http://www.aari.ru/resources/a0011_12/manual_op/content.html) (дата обращения: 15.12.2017).
9. Васильев В. В. Тенденции изменения климата на севере в Российской Арктике / В. В. Васильев, В. С. Селин // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2015. — № 1 (44). — С. 5–13.
10. Наблюдения за ледовой обстановкой: учеб. пособие. — СПб.: ГУ ААНИИ, 2009. — 360 с.
11. Митник Л. М. Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г / Л. М. Митник, Е. С. Хазанова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 2. — С. 100–113.
12. Лебедев Г. А. О значении переохлаждения морской воды и образования внутриводного льда при

формировании водной массы и ледяного покрова в Восточно-Сибирском и Чукотском морях / Г. А. Лебедев, В. И. Федотов, Н. В. Черепанов // *Метеорология и гидрология*. — 2014. — № 2. — С. 45–55.

13. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. д-ра географ. наук Е. У. Мирнова. — СПб.: ААНИИ, 2010. — 320 с.

14. Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [aari.ru/main.html](http://aari.ru/main.html) (дата обращения: 15.12.2017).

15. The U.S. National Ice Center (NIC) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.natice.noaa.gov/> (дата обращения: 15.12.2017).

16. Плотников В. В. Мониторинг ледовых условий в системе морей восточного сектора Арктики (Восточно-Сибирское, Чукотское моря) в конце XX начале XXI вв. / В. В. Плотников, О. Н. Руденко // *Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета*. — 2017. — Т. 40. — № 2. — С. 22–28.

17. Правила плавания в акватории Северного морского пути (утверждена приказом № 7 Министерства транспорта РФ от 17 января 2013 г.). С изменениями и дополнениями от 9 января 2017 г.

18. Regulations Amending the Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations // *Canadian Gazette*. — Ottawa, Canada, 1996. — Pp. 1729.

19. Arctic Ice regime Shipping System. Pictorial guide. — Canada: Canadian hydraulic centre, 2003. — 59 p.

## REFERENCES

1. *International code for ships operating in polar waters (Polar code)*. SPb.: АО «TsNIIMF», 2016.
2. *Atlas Arktiki*. M.: GUGK, 1985.
3. Bryazgin, N.N., and A.A. Dement'ev. *Opasnye meteorologicheskie yavleniya v Rossiiskoi Arktike*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1996.
4. *Klimat Rossii*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2004.
5. Benzemen, V.Yu., V.N. Komendantov, and V.A. Shmatkov. *Arkticheskaya transportnaya sistema: kratkaya istoriya i perspektivy razvitiya*. SPb.: OOO Blank izdatel'stvo, 2004.
6. Glukhov, V.G. "Detalizatsiya parametrov opasnykh dlya moreplavaniya yavlenii pogody." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2007): 27–28.
7. *Lotsiya Vostochno-Sibirskogo morya*. SPb.: GUNIO, 1988.
8. *Spravochnik po opasnym gidrometeorologicheskim i ledovym yavleniyam na trassakh Severnogo morskogo puti* / Internet-portal ESIMO. 2009. Web. 15 Dec. 2017 <[http://www.aari.ru/resources/a0011\\_12/manual\\_op/content.html](http://www.aari.ru/resources/a0011_12/manual_op/content.html)>.
9. Vasilyev, V.V. "Trends of climate change on the north and in the Russian Arctic." *The North and the Market: Forming the Economic Order* 1(44) (2015): 5–13.
10. *Nablyudeniya za ledovoi obstanovkoi. Uchebnoe posobie*. SPb.: GU AANII, 2009.
11. Mitnik, L.M., and E.S. Khazanova. "Ice cover dynamics in the East Siberian and Laptev Seas at the second half of October 2014 from remote sensing data." *Current problems in remote sensing of the Earth from space* 12.2 (2015): 100–113.
12. Lebedev, G.A., V.I. Fedotov, and N.V. Cherepanov. "Significance of sea water supercooling and intrawater ice generation for the formation of water mass and ice cover in the East Siberian and Chukchi seas." *Russian Meteorology and Hydrology* 39.2 (2014): 93–99. DOI: 10.3103/S1068373914020046.
13. Mironov, E.U., ed. *Opasnye ledovye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike*. SPb.: AANII, 2010.
14. Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr "Arkticheskii i antarkticheskii nauchno-issledovatel'skii institut". Web. 15 Dec. 2017 <[aari.ru/main.html](http://aari.ru/main.html)>.
15. The U.S. National Ice Center (NIC). Web. 15 Dec. 2017 <<http://www.natice.noaa.gov/>>.
16. Plotnikov, V.V., and O.N. Rudenko. "Monitoring of ice conditions in system of the seas of east sector of the Arctic (the East Siberian, Chukchi sea) at the end of XX beginning of the XXI centuries." *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 40.2 (2017): 22–28.
17. *Pravila plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti (utverzhdena prikazom № 7 Ministerstva transporta RF ot 17 yanvarya 2013 g.)*
18. "Regulations Amending the Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations." *Canadian Gazette*.

Ottawa, Canada, 1996.

19. *Arctic Ice regime Shipping System. Pictorial guide.* Canada: Canadian hydraulic centre, 2003.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шаронов Андрей Юрьевич** —

кандидат географических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7

e-mail: [Arcmeteo@mail.ru](mailto:Arcmeteo@mail.ru), [SharonovAJ@gumrf.ru](mailto:SharonovAJ@gumrf.ru)

**Шматков Владимир Антонович** —

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7

e-mail: [Arcmeteo@mail.ru](mailto:Arcmeteo@mail.ru), [kaf\\_nge@gumrf.ru](mailto:kaf_nge@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sharonov, Andrei Yu.** —

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation

e-mail: [Arcmeteo@mail.ru](mailto:Arcmeteo@mail.ru), [SharonovAJ@gumrf.ru](mailto:SharonovAJ@gumrf.ru)

**Shmatkov, Vladimir A.** —

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: [Arcmeteo@mail.ru](mailto:Arcmeteo@mail.ru), [kaf\\_nge@gumrf.ru](mailto:kaf_nge@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 декабря 2017 г.*

*Received: December 20, 2017.*



DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-183-190

## INVESTIGATION OF THE PROCESS OF THE SEISHI INFLUENCE ON THE ACOUSTIC FIELD OF CLOSED SHALLOW WATER AREAS

**P. A. Starodubtsev<sup>1,2</sup>, N. L. Khalaev<sup>1</sup>, E. N. Baklanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Pacific Higher Naval School S. O. Makarov, Vladivostok, Russian Federation

<sup>2</sup> — Far Eastern State Technical Fisheries University, 690087,  
Vladivostok, Russian Federation

*An approach to the solution of the problem of the development and improvement of small-scale monitoring systems for underwater situation through their spatial positioning with the determination of the locations of the seichy areas. The object of research is closed water areas and shallow areas of Peter the Great Bay (Primorsky Region). The subject of the research is the seiches and their influence on the hydroacoustic signal propagating in the water environment, taking into account the new elements of the marine environment monitoring paradigm. During the research, experimental methods are used, expressed in the formation of new elements of the paradigm of monitoring and transformation of approaches that represent the physics of hydrodynamic processes in the marine environment. The paradigm of the classical scheme for monitoring and control the state of the environment, consisting of observation and assessment, is supplemented by methods of forecasting the state of the environment and estimating the predicted state. Within the framework of monitoring, as a statistical process, the frequency of measurements is justified to prevent the missing information about the marine environment, where the intensity of data acquisition is determined by the maximum number of occurrences of the explored (measured) events according to the requirements of the Nyquist-Shannon theorem. The processes and wave phenomena on the surface and in the depth of the marine environment of enclosed water areas and shallow areas are theoretically and experimentally justified, due to the quasi-horizontal horizontally-vertical displacement of water masses, reminiscent of attractors. Seysches in shallow areas, semi-enclosed bays of Peter the Great Bay are standing free oscillations of a fluid in a “semi-enclosed” space with the formation of a single-node structure in it. According to the degree of influence on the hydroacoustic signal, seiche is a multi-vector spatial zone in deterministic dynamic chaos with a minimum integral level of natural sea noise or a zone of the most favorable arrangement of acoustic (combined) monitoring systems for the acoustic field of the marine environment.*

*Keywords: Seishi, seiches node, seiche oscillations, shallow-water area, compensatory flow, one-node structure, vortex processes, underwater monitoring, paradigm of monitoring, standing free vibrations.*

### For citation:

Starodubtsev, Pavel A., Nikolai L. Khalaev, and Evgenii N. Baklanov. “Investigation of the process of the seishi influence on the acoustic field of closed shallow water areas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-183-190.

**УДК 534.87**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛИЯНИЯ СЕЙШИ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАМКНУТЫХ АКВАТОРИЙ МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНОВ

**П. А. Стародубцев<sup>1,2</sup>, Н. Л. Халаев<sup>1</sup>, Е. Н. Бакланов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С. О. Макарова,  
Владивосток, Российская Федерация

<sup>2</sup> — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный универси-  
тет (Дальрыбвтуз),  
Владивосток, Российская Федерация

*Представлен подход к решению проблемы развития и совершенствования малогабаритных систем освещения подводной обстановки через их пространственное позиционирование с определением мест нахождения районов сейши. Объект исследований — замкнутые акватории и мелководные районы залива Петра Великого (Приморский край). Предмет исследований — сейши и их влияние на гидроакустический*

сигнал, распространяющийся в водной среде, с учетом новых элементов парадигмы мониторинга морской среды. При проведении исследований использованы экспериментальные методы, выраженные в формировании новых элементов парадигмы мониторинга и трансформации подходов, представляющих физику гидродинамических процессов в морской среде. Парадигма классической схемы мониторинга и контроля состояния среды, состоящая из наблюдения и оценки, дополнена методами прогноза состояния среды и оценки прогнозируемого состояния. В рамках мониторинга как статистического процесса для недопущения пропуска информации о морской среде обоснована частота измерений, при которой интенсивность получения данных определяется максимальным числом повторяемости исследуемых (измеряемых) событий согласно требованиям теоремы отсчетов о дискретности проводимых замеров. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и волновые явления на поверхности и в толще морской среды замкнутых акваторий и мелководных районов, обусловленные квазислоистым горизонтально-вертикальным перемещением водных масс, напоминающим собой аттракторы. Сейши в мелководных районах и полузакрытых бухтах залива Петра Великого представляют собой стоячие свободные колебания жидкости в «полузамкнутом» пространстве с формированием в нем одноузловой структуры. По степени влияния на гидроакустический сигнал сейши представляют собой разновекторную пространственную зону в детерминированном динамическом хаосе с минимальным интегральным уровнем природных шумов моря, или зону наиболее благоприятного расположения акустических (комбинированных) систем мониторинга акустического поля морской среды.

*Ключевые слова:* сейши, узел сейши, сейшевые колебания, мелководный район, компенсационное течение, одноузловая структура, вихревые процессы, освещение подводной обстановки, парадигма мониторинга, стоячие свободные колебания.

**Для цитирования:**

Стародубцев П. А. Исследование процесса влияния сейши на акустическое поле замкнутых акваторий мелководных районов / П. А. Стародубцев, Н. Л. Халаев, Е. Н. Бакланов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-183-190.

## **Введение (Introduction)**

Необходимость решения задачи дальнего обнаружения акустически малозаметных морских объектов на современном этапе создания и модернизации существующих систем подводного наблюдения неизбежно ведет к пересмотру ряда фундаментальных положений и, прежде всего, парадигмы такого понятия, как *мониторинг морской среды*, в том числе и для обеспечения безопасности мореплавания.

В рамках теоретических разработок и натурных исследований, проводимых в военно-научной школе (ВНШ) № 37 «Низкочастотная активно-пассивная и параметрическая (просветная) гидролокация морской среды», зарегистрированной в реестре школ Министерства обороны РФ при Тихоокеанском высшем военно-морском училище имени С. О. Макарова (ТОВВМУ), за парадигму мониторинга морской среды берется дополненная новыми подходами совокупность научных установок, представлений и терминов, имеющая классическое определение, данное в [1] – [3].

## **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Парадигма мониторинга ВНШ отличается от классической схемы контроля состояния среды тем [1] – [3], что кроме наблюдения и оценки состояния среды неотъемлемыми частями мониторинга являются:

- метод прогноза состояния среды;
- метод оценки прогнозируемого состояния.

Эти дополнительные методы в парадигме мониторинга хорошо отображаются в виде структурной схемы системы, представленной на рис. 1.

Как статистический процесс мониторинг требует определения частоты проведения измерений какого-либо наиболее важного параметра для недопущения пропуска информации о морской среде. За критерий частоты измерений состояния морской среды, выработанный в ВНШ, берется понятие «интенсивность получения данных о морской среде». Данная величина должна определяться максимальным числом повторяемости исследуемых (измеряемых) событий ежедневно

в течение года и требованием теоремы А. В. Котельникова (в англояз. литературе — теорема Найквиста–Шеннона, или теорема отсчётов) о дискретности проводимых замеров.

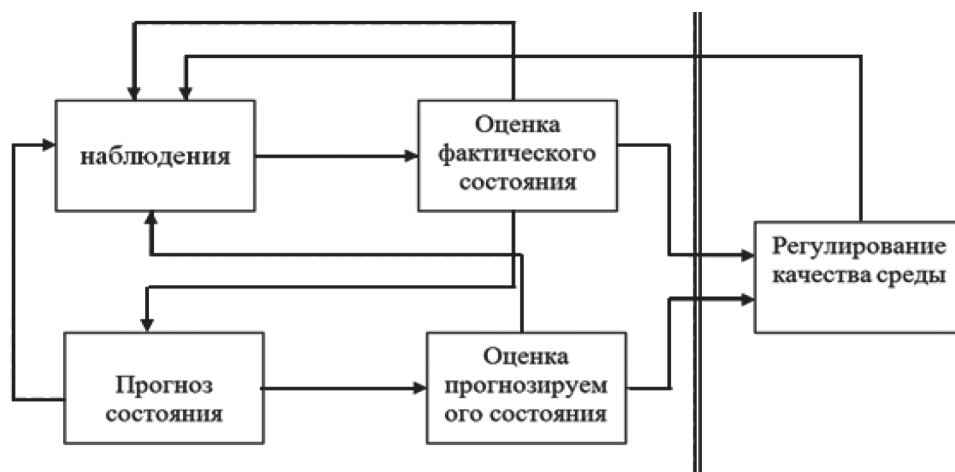


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга

Подлежат трансформации в существующей парадигме мониторинга [1] и методы, представляющие физику гидродинамических процессов в морской среде. Поэтому эти методы в первую очередь уточнялись и актуализировались при проведении НИР [2] в мелководных районах и бухтах залива Петра Великого (Приморский край). Для уточнения натурных исследований НИР в работах [2] и [3] было достаточно подробно описано присутствие детерминированного динамического хаоса в водной среде этих районов. Дополнительные натурные исследования, проводимые в этих районах в рамках НИР [4] по моделированию вихревых процессов в морской среде, позволили на основе источников [2] – [4] сделать ряд принципиальных выводов, определяющих алгоритм последующих действий в рамках новой парадигмы мониторинга морской среды.

### Результаты (Results)

Процессы и волновые явления на поверхности и в толще морской среды замкнутых акваторий и мелководных районов обусловлены квазислоистым горизонтально-вертикальным перемещением водных масс, напоминающим собой аттракторы. Ветер, ветровые волны, стоячие волны, сгоны-нагоны уровня воды, наличие устойчивых течений и сила Кориолиса оказывают влияние на формирование и динамику гидроакустического поля исследуемого района.

Достаточно «сложное» для полного объяснения влияние на структуру и характер акустического поля среды (например, в бухте Стрелок залива Петра Великого) оказывают сейши. Как показали исследования [4], в данном районе они представляют собой [5] стоячие свободные колебания жидкости в «полузамкнутом» пространстве (рис. 2) с формированием одноузловой структуры.

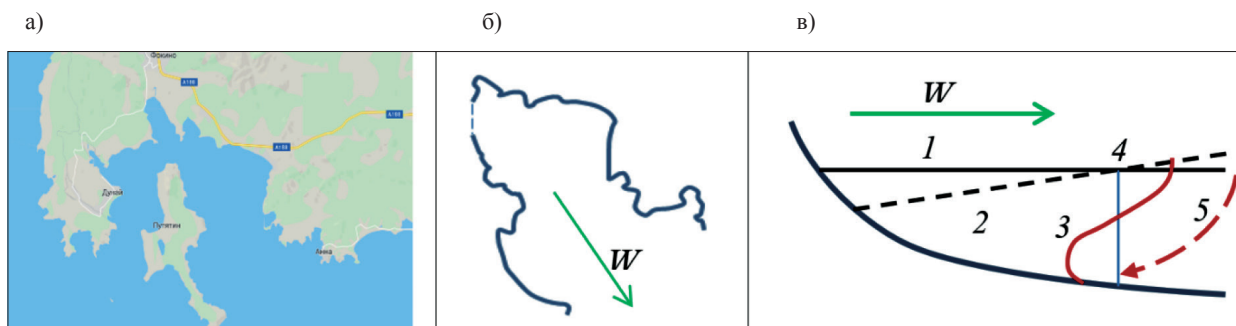


Рис. 2. Формирование одноузловой сейши:

а — акватория залива Петра Великого; б — направление нагонного ветра;

в — последовательность появления одноузловой сейши

Последовательность формирования и объяснение появления одноузловой структуры сейши следующая:

- под воздействием нагонного ветра  $W$  начинается формирование апвеллинга;
- уровень невзволнованной поверхности  $1$  переходит в уровень  $2$ , возникающий под действием нагонного ветра;
- водная поверхность начинает колебаться около узла сейши  $4$ ;
- с окончанием воздействия нагонного ветра возникает компенсационное течение  $5$ ;
- вертикальное распределение скорости течения принимает волновой характер  $3$ ;
- под влиянием вязких свойств морской воды вокруг узловой точки  $4$  возникает зона, где амплитуда приливной волны будет равна нулю.

Для экспериментального подтверждения данного вывода в ходе проведения НИР [4] были выполнены измерения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в шести точках одного из мелководных районов залива Петра Великого. В ходе измерений было установлено (рис. 3), что в пяти точках ( $A - Д$ ) ВРСЗ имеет большую изменчивость от точки к точке и определяется характеристиками только данной точки. В последней шестой точке (точка  $E$  на выходе из бухты одного из мелководных районов залива Петра Великого) было выполнено 10 измерений с промежутками через 1 ч и установлено, что такая зависимость в точке  $E$  пропадает, о чем свидетельствуют данные, приведенные в таблице ВРСЗ, и температуры воды на разных глубинах (рис. 4).

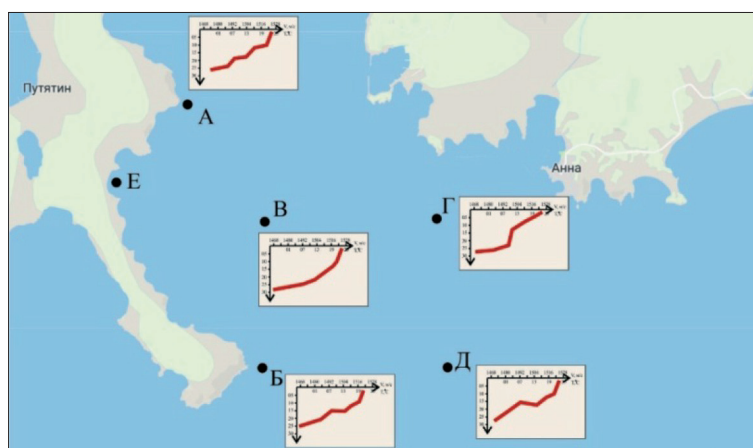


Рис. 3. ВРСЗ в пяти точках одного из мелководных районов залива Петра Великого

#### Данные о температуре воды и ВРСЗ на разных глубинах

| $H, м$ | 17 ч 00 мин<br>(время измерения) |          | 18.00         |          | 19.00         |          | 21.00         |          | 22.00         |          |
|--------|----------------------------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
|        | $t, ^\circ C$                    | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ |
| 0      | 25                               | 1528     | 25            | 1528     | 25            | 1528     | 24            | 1526     | 24            | 1526     |
| 5      | 22                               | 1519     | 22            | 1519     | 22            | 1519     | 21            | 1520     | 21            | 1520     |
| 10     | 20                               | 1510     | 19            | 1512     | 19            | 1512     | 19            | 1512     | 18            | 1513     |
| 15     | 16                               | 1502     | 16            | 1502     | 16            | 1502     | 16            | 1502     | 16            | 1502     |
| 20     | 13                               | 1492     | 13            | 1492     | 13            | 1492     | 13            | 1492     | 12            | 1490     |
| 25     | 9                                | 1480     | 8             | 1478     | 7             | 1474     | 7             | 1474     | 7             | 1474     |
| 30     | 7                                | 1474     | 7             | 1474     | 6             | 1472     | 6             | 1472     | 6             | 1472     |
| $H, м$ | 23.00                            |          | 00.00         |          | 01.00         |          | 02.00         |          | 03.00         |          |
|        | $t, ^\circ C$                    | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ | $t, ^\circ C$ | $C, м/с$ |
| 0      | 23                               | 1525     | 22            | 1519     | 21            | 1520     | 20            | 1510     | 19            | 1512     |
| 5      | 20                               | 1510     | 19            | 1512     | 18            | 1513     | 18            | 1513     | 17            | 1511     |
| 10     | 18                               | 1513     | 16            | 1502     | 16            | 1502     | 15            | 1501     | 14            | 1500     |
| 15     | 16                               | 1502     | 14            | 1500     | 12            | 1490     | 12            | 1490     | 11            | 1489     |
| 20     | 11                               | 1489     | 11            | 1489     | 9             | 1480     | 8             | 1478     | 7             | 1474     |
| 25     | 6                                | 1472     | 6             | 1472     | 5             | 1471     | 5             | 1471     | 5             | 1471     |
| 30     | 6                                | 1472     | 5             | 1471     | 5             | 1471     | 4             | 1470     | 4             | 1470     |

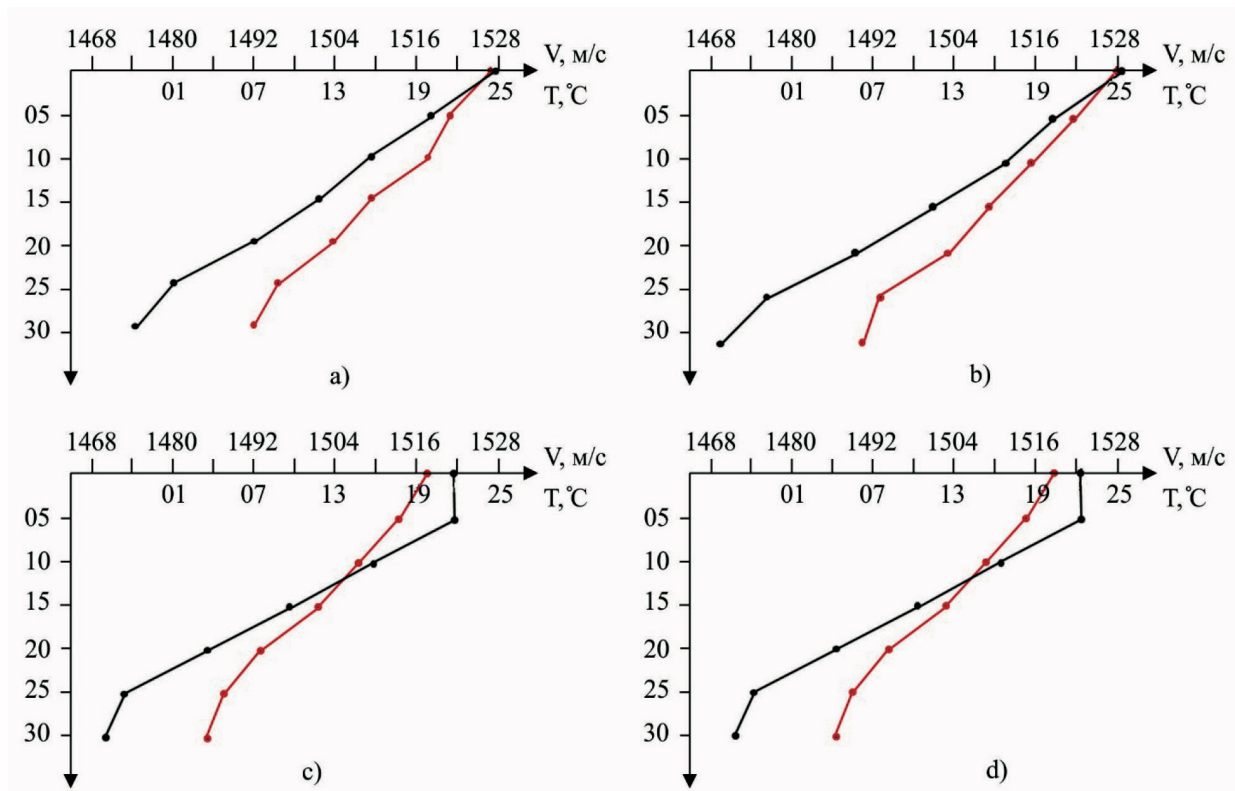


Рис. 4. Распределения температуры и скорости звука в узле (точка E):  
a — 17:00; b — 23:00; c — 02:00; d — 05:00

Анализ работ по гидродинамическим характеристикам моря показал, что сейши являются одним из наиболее распространенных видов колебаний уровня поверхности в закрытых и полужакрытых водоемах Мирового океана [6] – [8]. Для оценки прогнозируемого состояния, предложенного как новый элемент парадигмы мониторинга морской среды, периоды колебаний уровня моря ( $T_1$ ) для водоемов с одноузловой сейши определяются по методу Мериана:

$$T_1 = \frac{2L}{\sqrt{gH_{cp}}}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина осевой линии водоема, равная половине длины одноузловой сейши;  $H_{cp}$  — средняя глубина водоема;  $g$  — ускорение свободного падения.

Для мелководного реального района залива Петра Великого, где  $L = 17,1$  км;  $H_{cp} = 39$  м минимальный период сейшевых колебаний составляет 28,5 мин. Поэтому, чтобы иметь информацию о гидроакустическом поле в исследуемом районе, необходимо замеры производить не реже чем через 14,25 мин.

### Обсуждение (Discussion)

В последней шестой точке (точка E, рис. 3) мелководного района залива Петра Великого вертикальное распределение скорости течения имеет минимальные отклонения от среднего значения, что соответствует узлу колебаний стоячих волн в данном районе водной среды.

Как показали проведенные измерения [2], [4], именно эта зона обладает минимальным интегральным уровнем природных шумов моря и является зоной наиболее благоприятного расположения акустических и комбинированных систем мониторинга акустического поля морской среды.

Другими словами, как элемент новой парадигмы «прогноз состояния среды» длительный акустический мониторинг точек в закрытых и полужакрытых мелководных районах позволяет экспериментальным путем определить узлы сейши в ходе выбора места установки стационарных



средств гидроакустического, комбинированного исследования и мониторинга морской среды по минимальному уровню природных шумов моря и вертикального распределения скорости течения.

Сейши в мелководных районах и полузакрытых бухтах представляют собой, в отличие от [9], [10], стоячие свободные колебания жидкости в «полузамкнутом» пространстве с формированием в нем одноузловой структуры.

Частота проведения измерений параметров водной среды для недопущения пропуска информации о морской среде для мелководного реального района залива Петра Великого должна составлять половину минимального периода сейшевых колебаний.

По степени влияния на сигнал сейши есть разновекторная пространственная зона в детерминированном динамическом хаосе с минимальным интегральным уровнем природных шумов моря, или зона наиболее благоприятного расположения акустических (комбинированных) систем мониторинга акустического поля морской среды.

При длительном акустическом мониторинге  $n$ -го количества точек в закрытых и полузакрытых мелководных районах существует возможность, от противного, экспериментальным путем по уровню интегральных помех определить узлы сейши в ходе выбора места установки стационарных средств гидроакустического (комбинированного) исследования и мониторинга морской среды.

### Заключение (Conclusion)

На основании анализа результатов натурных измерений, представленных в данной научной статье из монографии [2] и НИР [4], можно отметить, что к парадигме мониторинга морской среды мелководных районов, полузакрытых бухт и теории влияния сейш на акустический сигнал, распространяющийся в водной среде, появились достаточно фундаментальные и обоснованные дополнения.

Сейши, по большей части, хоть и не несут в себе какой-либо угрозы имуществу и безопасности населения приморских районов, представляют некоторую опасность для мореплавания. Узлы сейш располагаются у выхода из заливов и портов. В этих узлах происходят горизонтальные перемещения воды, которые при больших периодах сейш ( $T > 0,5$  ч) способствуют возникновению в них довольно сильных, быстро изменяющих свое направление течений, которые отрицательно влияют на управляемость судов, входящих в порт или выходящих из него [11], [12].

*Авторы статьи благодарят сотрудников кафедры физики и общетехнических дисциплин Тихоокеанского высшего военно-морского училища имени адмирала С. О. Макарова и кафедры судовождения Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета (Дальрыбвтуз) за оказанную помощь при подготовке акустических приборов к проведению натурных экспериментов и обработке полученных при морских измерениях данных.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироненко М. В. Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды: монография / М. В. Мироненко, А. Е. Малашенко, Л. Э. Карачун, А. М. Василенко. — Владивосток: ДВО РАН, 2006. — 173 с.
2. Мироненко М. В. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы: монография / М. В. Мироненко, А. Е. Малашенко, А. М. Василенко [и др.]. — Владивосток: ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН, 2014. — 402 с.
3. Пат. 2536836 Российская Федерация, МПК G01V 1/38. Система параметрического приема гидрофизических и геофизических волн в морской среде / М. В. Мироненко, А. Е. Малашенко, Л. Э. Карачун, А. М. Василенко; заяв. и патентообл. СКБ САМИ ДВО РАН. — № 2013130194/28; заявл. 01.07.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.

4. Дальнее обнаружение слабозаметных неоднородностей морской среды маломощными просветными сигналами: Отчет по НИР ГБТ № 406/2008. — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2008. — 161 с.
5. Разработка теоретических основ просветных технологий гидроакустического мониторинга океанской среды: Отчет по НИР ГБТ 668/2016-2017. — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2017. — 130 с.
6. Жуков Ю. Н. Приливы и сейши. Как различить? / Ю. Н. Жуков // Навигация и гидрография. — 2015. — № 39. — С. 42–47.
7. Жуков Ю. Н. Метод расчета гармонических постоянных приливов по наблюдениям с пропусками / Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова // Навигация и гидрография. — 2017. — № 48. — С. 63–69.
8. Мироненко М. В. Информационно-аналитическая система расчета и анализа просветного гидроакустического поля в системах мониторинга морских акваторий / М. В. Мироненко, А. М. Василенко, Л. Э. Карачун // Датчики и системы. — 2015. — № 9–10 (196). — С. 12–16.
9. Ростов И. Д. Атлас по океанографии Берингова, Охотского, и Японского морей / И. Д. Ростов, Г. И. Юрасов, Н. И. Рудых [и др.]. — Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2003. — 400 с.
10. Горовой С. В. Некоторые результаты экспериментального оценивания трехмерных плотностей распределения выборочных значений давления гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря / С. В. Горовой // Материалы докладов VIII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». — Владивосток, ТОИ ДВО РАН, 2013. — С. 59–63.
11. Cerralbo P. Hydrodynamic response in a microtidal and shallow bay under energetic wind and seiche episodes / P. Cerralbo, M. Grifoll, M. Espino // Journal of Marine Systems. — 2015. — Vol. 149. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2015.04.003.
12. Qin R. Development of a GIS-based integrated framework for coastal seiches monitoring and forecasting: A North Jiangsu shoal case study / R. Qin, L. Lin // Computers & Geosciences. — 2017. — Vol. 103. — Pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.03.010.

## REFERENCES

1. Mironenko, M.V., A.E. Malashenko, L.E. Karachun, and A.M. Vasilenko. *Nizkochastotnyi prosvetnyi metod dal'nei gidrolokatsii gidrofizicheskikh polei morskoi sredy: monografiya*. Vladivostok: DVO RAN, 2006.
2. Mironenko, M.V., A.E. Malashenko, A.M. Vasilenko, et al. *Nelineinaya prosvetnaya gidroakustika i sredstva morskogo priborostroeniya v sozdanii dal'nevostochnoi radiogidroakusticheskoi sistemy osveshcheniya atmosfery, okeana i zemnoi kory, monitoringa ikh polei razlichnoi fizicheskoi prirody. Monografiya*. Vladivostok: FGBUN SKB SAMI DVO RAN, 2014.
3. Mironenko, M.V., A.E. Malashenko, L.E. Karachun, and A.M. Vasilenko. RU 2 536 836 C1, IPC G 01 V 1/38. Sistema parametricheskogo priema gidrofizicheskikh i geofizicheskikh voln v morskoi srede. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Dec. 2014.
4. *Dal'nee obnaruzhenie slabozametnykh neodnorodnostei morskoi sredy malomoshchnymi pro-svetnymi signalami: Otchet po NIR GBT № 406/2008*. Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii rybokhozyaistvennyi universitet, 2008.
5. *Razrabotka teoreticheskikh osnov prosvetnykh tekhnologii gidroakusticheskogo monitoringa okeanskoj sredy: Otchet po NIR GBT 668/2016-2017*. Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii rybokhozyaistvennyi universitet, 2017.
6. Zhukov, Yu.N. “Prilivy i seishi. Kak razlichit'?” *Navigatsiya i gidrografiya* 39 (2015): 42–47.
7. Zhukov, Yu.N., and E.V. Fedorova. “Metod rascheta garmonicheskikh postoyannykh prilivov po nablyudeniya s propuskami.” *Navigatsiya i gidrografiya* 48 (2017): 63–69.
8. Mironenko, Mihail V., Anna M. Vasilenko, and Leonard E. Karachun. “Information-analytical system of calculation and analysis of translucent hydroacoustic field in monitoring of sea areas.” *Sensors & Systems* 9-10 (196) (2015): 12–16.
9. Rostov, I.D., G.I. Yurasov, N.I. Rudykh, et al. *Atlas po okeanografii Beringova, Okhotskogo, i Yaponskogo morei*. Vladivostok: TOI DVO RAN, 2003.
10. Gorovoi, S.V. “Nekotorye rezul'taty eksperimental'nogo otsenivaniya trekhmernykh plotnostei raspredeleniya vyborochnykh znachenii davleniya gidroakusticheskikh шумов v zalive Petra Velikogo Yaponskogo mo-

ры.” *Materialy dokladov VIII Vserossiiskogo simpoziuma «Fizika geosfer»*. Vladivostok, TOI DVO RAN, 2013: 59–63.

11. Cerralbo, Pablo, Manel Grifoll, and Manuel Espino. “Hydrodynamic response in a microtidal and shallow bay under energetic wind and seiche episodes.” *Journal of Marine Systems* 149 (2015): 1–13. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2015.04.003.

12. Qin, Rufu, and Liangzhao Lin. “Development of a GIS-based integrated framework for coastal seiches monitoring and forecasting: A North Jiangsu shoal case study.” *Computers & Geosciences* 103 (2017): 70–79. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.03.010.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Стародубцев Павел Анатольевич —**

доктор технических наук, профессор  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище  
имени С. О. Макарова  
690062, Российская федерация, Владивосток,  
Камский пер., 6  
e-mail: [spa1958@mail.ru](mailto:spa1958@mail.ru)

**Халаев Николай Лукич —**

кандидат технических наук, доцент  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище  
имени С. О. Макарова  
690062, Российская федерация, Владивосток,  
Камский пер., 6  
e-mail: [halaevn@mail.ru](mailto:halaevn@mail.ru)

**Бакланов Евгений Николаевич —**

доцент  
Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз)  
690087, Российская федерация, Владивосток, ул.  
Луговая, 52-Б  
e-mail: [baklanoven@mail.ru](mailto:baklanoven@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Starodubtsev, Pavel A. —**

Dr. of Technical Sciences, professor  
Pacific Higher  
Naval School S.O. Makarov  
6 Kamskii Lane, Vladivostok, 690062,  
Russian Federation  
e-mail: [spa1958@mail.ru](mailto:spa1958@mail.ru)

**Khalaev, Nikolai L. —**

PhD, associate professor  
Pacific Higher  
Naval School S.O. Makarov  
6 Kamskii Lane, Vladivostok, 690062,  
Russian Federation  
e-mail: [halaevn@mail.ru](mailto:halaevn@mail.ru)

**Baklanov, Evgenii N. —**

Associate professor  
Far Eastern State Technical  
Fisheries University  
52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,  
Russian Federation  
e-mail: [baklanoven@mail.ru](mailto:baklanoven@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Received: January 15, 2018.

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200

## FORCE ANALYSIS OF RECIPROCATING ENGINE USING DYNAMIC MODELS OF CRANK MECHANISM

**A. I. Yamanin<sup>1</sup>, V. A. Zhukov<sup>2</sup>, S. O. Baryshnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

<sup>2</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The required level of reliability of modern forced engines can be provided only on condition of their high-quality design, which is based on the strong calculation of the most loaded parts, which include parts crank mechanism. The article shows the importance of kinematic and dynamic analysis of crank mechanism in the process of designing an internal combustion engine and their role in ensuring the reliability of the engine, describes ways to solve the problem of kinematic and dynamic analysis of crank mechanism. The comparative analysis of static and dynamic models of crank-crank mechanisms is given. Calculation schemes, the sequence of kinematic and dynamic analysis of the mechanism, the system of equations, allowing to determine the forces acting in the crank mechanism, are presented. On the basis of the vector diagrams of loads on the crankshaft connecting rod presented in the article the expediency of application of dynamic models of crank mechanisms with SIM-metric and asymmetric connecting rods for analytical calculations of piston engines is proved. The results of analytical calculations of the dynamics of crank mechanism of four-stroke diesel supercharged size 13/14 are presented. It is shown that with the modern development of computer technology and software, the complexity of such calculations practically does not increase, and the results are close to those obtained by numerical analysis of dynamics using three-dimensional solid-state models. Recommendations on the use of "light" software products Ltd, which allows to perform kinematic and dynamic analysis of mechanisms in the educational Pro-process and solution design tasks. The results presented in the article prove the appropriateness of using the coordinate method to determine the kinematic parameters of the third replacement weight of the connecting rod and the ability to ensure the required accuracy of the calculations performed on the basis of the analysis of rod systems.*

*Keywords: crank mechanism, dynamical model of connecting rod, static model of connecting rod, analysis of forces, numerical calculation, vector diagrams of loads.*

### For citation:

Yamanin, Alexander I., Vladimir A. Zhukov, and Sergey O. Baryshnikov. "Force analysis of reciprocating engine using dynamic models of crank mechanism." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

**УДК 621.432**

## СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

**А. И. Яманин<sup>1</sup>, В. А. Жуков<sup>2</sup>, С. О. Барышников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,  
Ярославль, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Требуемый уровень надежности современных форсированных двигателей может быть обеспечен лишь при условии их качественного проектирования, в основе которого лежат прочностные расчеты наи-*

более нагруженных деталей, к которым относятся детали кривошипно-шатунного механизма. В статье показана важность кинематического и динамического анализа кривошипно-шатунного механизма в процессе проектирования двигателя внутреннего сгорания и его роль в обеспечении надежности двигателя, описаны способы решения задачи кинематического и динамического анализа кривошипно-шатунного механизма. Приведен сравнительный анализ статических и динамических моделей кривошипно-шатунных механизмов. Представлены расчетные схемы, последовательность проведения кинематического и динамического анализа механизма; рассмотрены системы уравнений, позволяющие определить усилия, действующие в кривошипно-шатунном механизме. На основании приведенных в статье векторных диаграмм нагрузок на шатунную шейку коленчатого вала обоснована целесообразность применения при аналитических расчетах динамики поршневых двигателей динамических моделей кривошипно-шатунных механизмов с симметричными и несимметричными шатунами. Представлены результаты аналитических расчетов динамики кривошипно-шатунного механизма четырехтактного дизеля с наддувом размерностью 13/14. Показано, что при современном развитии вычислительной техники и программного обеспечения трудоемкость таких расчетов практически не увеличивается, а результаты приближаются к получаемым при численном анализе динамики с применением трехмерных твердотельных моделей. Даны рекомендации по использованию «легких» программных продуктов. Представленные в статье результаты доказывают перспективность использования координатного метода для определения кинематических параметров третьей замещающей массы шатуна и возможность обеспечения требуемой точности расчетов, выполняемых на основании анализа стержневых систем.

**Ключевые слова:** кривошипно-шатунный механизм, статическая модель шатуна, динамическая модель шатуна, силовой анализ, численный расчет, векторные диаграммы нагрузок.

**Для цитирования:**

Яманин А. И. Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма / А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

## Введение (Introduction)

Устойчивой тенденцией современного транспортного двигателестроения является форсирование двигателей по среднему эффективному давлению, что неизбежно приводит к повышению тепловых и механических нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма (КШМ). В связи с этим возрастает значение расчетов деталей КШМ на прочность, которые должны обеспечивать требуемый уровень надежности двигателей при минимальной массе и материалоемкости деталей. В основе прочностного расчета деталей КШМ лежит кинематический и динамический анализ КШМ [1]. Создание таких сложных и наукоемких объектов, как современные поршневые двигатели, невозможно без использования компьютерных технологий и специализированных программных продуктов, обеспечивающих возможность твердотельного моделирования, инженерного анализа конструкций и технологической подготовки производства (последовательности CAD-CAE-CAM) [2]. Использование компьютерных технологий позволяет не только существенно сократить сроки создания нового двигателя, но и провести многовариантный анализ конструкции. Особая актуальность сокращения сроков проектирования и подготовки производства новых и модернизированных двигателей обусловлена ситуацией, сложившейся в отечественном двигателестроении, и острой необходимостью создания отечественных конкурентоспособных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [3]. Корректность результатов кинематического и динамического анализа КШМ ДВС является обязательным условием достоверности прочностных расчетов деталей. Ошибки, допущенные на данном этапе, неизбежно приведут к низкому качеству конструкторской разработки и недостаточной надежности двигателя.

В процессе динамических расчетов поршневых двигателей используются различные модели их преобразующих механизмов, в том числе КШМ. Эти модели могут быть континуальными и дискретными. Использование континуальных моделей связано с необходимостью предварительной разработки трехмерной компьютерной модели механизма и дальнейшего применения специализированных программных продуктов для исследования динамики механических и мехатронных систем. Это затрудняет применение континуальных моделей на ранних стадиях проектирова-



ния, несмотря на наличие существенных преимуществ по точности [4]. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что при расчетах в среде упомянутых программных продуктов уравнения движения звеньев изучаемого механизма формируются на базе уравнения Лагранжа и впоследствии интегрируются численными методами.

Преимуществом дискретных моделей является их относительная простота, обуславливающая удобство использования на ранних стадиях проектирования. Например, в простейшем случае КШМ может быть представлен моделью, включающей две замещающие массы, одна из которых соответствует поступательно движущимся частям механизма, а вторая — неуравновешенным вращающимся частям (рис. 1, а, б). Способы определения значений этих замещающих масс известны [5].

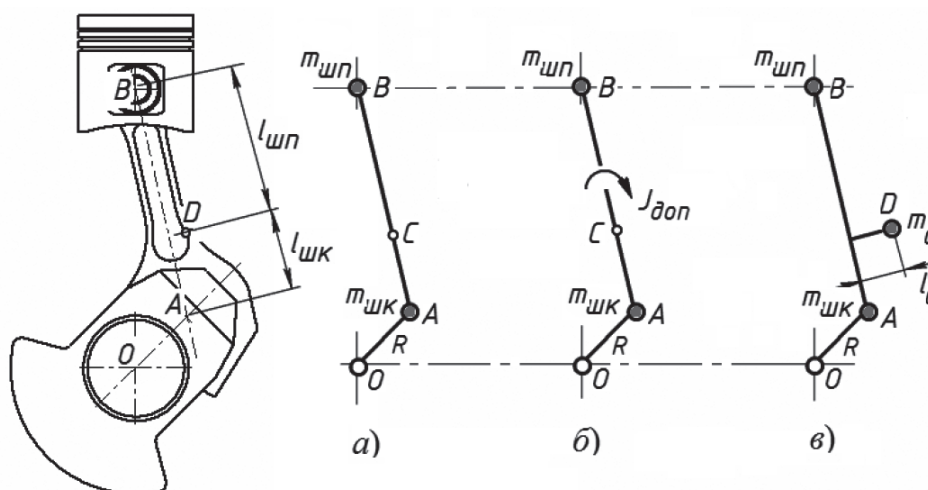


Рис. 1. Модели КШМ: а — статическая двухмассовая; б — динамическая двухмассовая; в — динамическая трехмассовая

Однако известно также, что в большинстве случаев использование двухмассовых моделей способствует возникновению погрешностей в расчетах [6]. Эти погрешности возникают вследствие того, что двухмассовые модели КШМ в большинстве случаев являются статическими, т. е. удовлетворяющими не всем условиям метода замещающих точек. Как правило, статичность модели КШМ определяется статичностью простейшей двухмассовой модели шатуна, масса которого  $M_{ш}$  приводится к центрам поршневой и кривошипной головок. Соответствующие замещающие массы при этом определяются по формулам:

$$m_{шп} = M_{ш} \frac{l_{шк}}{L}; \quad m_{шк} = M_{ш} \frac{l_{шп}}{L},$$

где  $L$  — длина шатуна;  $l_{шк}$  — расстояние от центра масс до центра кривошипной головки шатуна;  $l_{шп}$  — расстояние от центра масс до центра поршневой головки шатуна.

При этом момент инерции такой двухмассовой модели, равный  $i_{ш} = m_{шп} l_{шп}^2 + m_{шк} l_{шк}^2$ , как правило, отличается от реального момента инерции шатуна  $J_{ш}$ . Это может обуславливать погрешности при расчете сил в кинематических парах КШМ, нагрузок на подшипники и др.

Известны динамические, т. е. удовлетворяющие всем условиям метода замещающих точек, модели шатунов, включающие три массы, две из которых также размещаются в центрах  $B$  и  $A$  поршневой и кривошипной головок, а третья масса  $m_d$  — в центре масс  $D$  шатуна (рис. 1, в), который для несимметричных шатунов смещен на расстояние  $l_d$  от продольной оси стержня. Динамическая модель шатуна может включать две массы:  $m_{шп}$  и  $m_{шк}$ , а также дополнительный момент инерции  $J_{доп} = J_{ш} - i_{ш}$ .

Ранее были предложены трехмассовые динамические модели шатунов, применимые к так называемым *несимметричным шатунам*, у которых центр масс не лежит на оси стержня [7].

Задачи динамического анализа КШМ могут быть успешно решены путем создания оригинальных программ [8] и распространенных пакетов, позволяющих решать различные инженерные задачи [9] путем применения пакетов программ, использующих трехмерные модели [10] – [12] или виртуальные прототипы [13], [14]. Относительно таких моделей существует мнение о том, что сложность расчета кинематики точек, в которых размещаются дополнительные массы, препятствует их практическому применению. Предлагалось определять центростремительные и тангенциальные составляющие их ускорения, что даже для симметричных шатунов (тем более для несимметричных) действительно приводило к росту трудоемкости расчетов.

Целью предпринимаемого исследования является обоснование перспективности использования координатного метода для определения кинематических параметров третьей замещающей массы шатуна. Кроме того, здесь иллюстрируется эффективность использования для этих целей «легких» программных средств для исследования динамики механических и мехатронных систем. Такие программные средства (например, Working Model 2D, Artas SAM Professional<sup>1</sup> и др.) не требуют подробной разработки трехмерных моделей, для их успешной работы достаточно применение стержневых систем, показанных на рис. 1.

### Методы и материалы (Methods and materials)

Рассмотрим схему КШМ, включающую трехмассовую модель несимметричного шатуна. Центр масс последнего располагается в точке  $D$ , положение которой по отношению к продольной оси стержня  $AB$  определяется размерами  $l_{шп}$ ,  $l_{шк}$  и  $l_d$  (рис. 2, а).

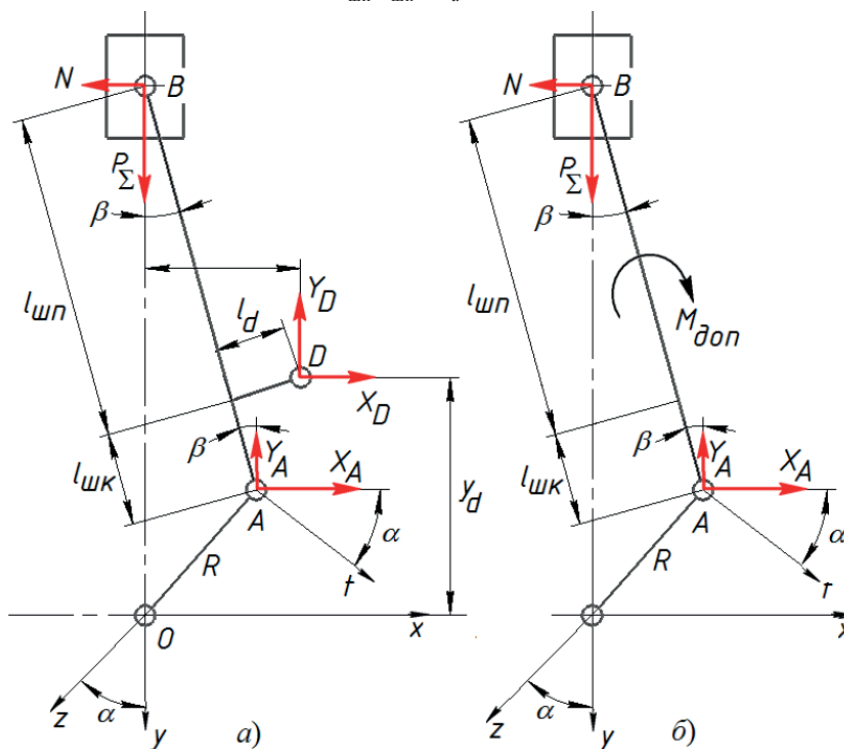


Рис. 2. К расчету сил в кинематических парах КШМ при использовании динамических моделей шатуна:  
а — динамическая трехмассовая; б — динамическая двухмассовая

Будем считать величину  $l_d$  положительной, если точка  $D$  смещена от продольной оси стержня в направлении вращения коленчатого вала. Замещающие массы  $m_{шп}$ ,  $m_{шк}$  и  $m_d$  по методу замещающих точек находятся по выражениям:

<sup>1</sup> На сайте фирмы-разработчика [www.artas.nl/en/downloads](http://www.artas.nl/en/downloads) доступна для скачивания бесплатная легальная учебная версия этого программного продукта, работающая с некоторыми ограничениями.

$$\left. \begin{aligned} m_d &= M_{\text{ш}} - \frac{J_{\text{ш}} \left( 1 + \frac{l_{\text{шк}}}{l_{\text{шп}}} \right)}{l_{\text{шп}} l_{\text{шк}} + l_d^2 \frac{l_{\text{шк}}}{l_{\text{шп}}} + l_{\text{шк}}^2 + l_d^2}; \\ m_{\text{шп}} &= \frac{J_{\text{ш}} \frac{l_{\text{шк}}}{l_{\text{шп}}}}{l_{\text{шп}} l_{\text{шк}} + l_d^2 \frac{l_{\text{шк}}}{l_{\text{шп}}} + l_{\text{шк}}^2 + l_d^2}; \\ m_{\text{шк}} &= \frac{J_{\text{ш}}}{l_{\text{шп}} l_{\text{шк}} + l_d^2 \frac{l_{\text{шк}}}{l_{\text{шп}}} + l_{\text{шк}}^2 + l_d^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

С корпусом КШМ свяжем неподвижную систему координат  $xOy$ ; с кривошипом — подвижную систему  $tAz$ . Шатун находится в равновесии под действием суммарной движущей силы  $P_{\Sigma}$ , силы инерции  $P_{jd}$ , развиваемой массой  $m_d$ , и реакций опор  $N$  и  $R_A$ . Силы  $P_{jd}$  и  $R_A$  представляются составляющими  $X_D, Y_D, X_A, Y_A$ . Составляющие  $X_D$  и  $Y_D$  определяются по выражениям:

$$X_D = -m_d W_{dx}; \quad Y_D = -m_d W_{dy}, \quad (2)$$

где  $W_{dx}, W_{dy}$  — составляющие ускорения точки  $D$  в неподвижной системе координат.

Если выразить координаты точки  $D$  через размеры механизма и углы поворота коленчатого вала  $\alpha$  и шатуна  $\beta$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} x_d &= R \sin \alpha - l_{\text{шп}} \sin \beta + l_d \cos \beta; \\ y_d &= -R \cos \alpha - l_{\text{шп}} \cos \beta - l_d \sin \beta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

или с учетом того, что  $\cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}$  и  $\lambda = R / L$ :

$$\left. \begin{aligned} x_d &= R \sin \alpha - l_{\text{шп}} \lambda \sin \alpha + l_d \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}; \\ y_d &= -R \cos \alpha - l_{\text{шп}} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} - l_d \lambda \sin \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

то при последующем двукратном дифференцировании могут быть найдены упомянутые составляющие ускорения:

$$\begin{aligned} W_{dx} &= \omega^2 \left[ (R - \lambda l_{\text{шп}}) \cos \alpha - \lambda^2 l_d \frac{16 \cos 2\alpha (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha) + \lambda^2 \sin^2 2\alpha}{16 (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}} \right]; \\ W_{dy} &= \omega^2 \left[ R \cos \alpha + l_d \sin \alpha + \lambda^2 l_{\text{шк}} \frac{16 \cos 2\alpha (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha) + \lambda^2 \sin^2 2\alpha}{16 (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}} \right]. \end{aligned}$$

### Результаты (Results)

При наличии программного обеспечения «легкого» уровня для исследования динамики механических и мехатронных систем составляющие ускорения могут быть определены численным способом [12], [15]. На рис. 3 показана соответствующая стержневая модель КШМ двигателя типа ЧН 13/14, для которого  $l_{\text{шк}} = 0,097$  м,  $l_{\text{шп}} = 0,168$  м,  $l_d = 0,009$  м<sup>1</sup>. Зная массу  $m_d$ , по формулам (2) найдем составляющие силы инерции, развиваемой этой массой.

<sup>1</sup> Параметры модели шатуна определены экспериментально методами взвешивания и качания.

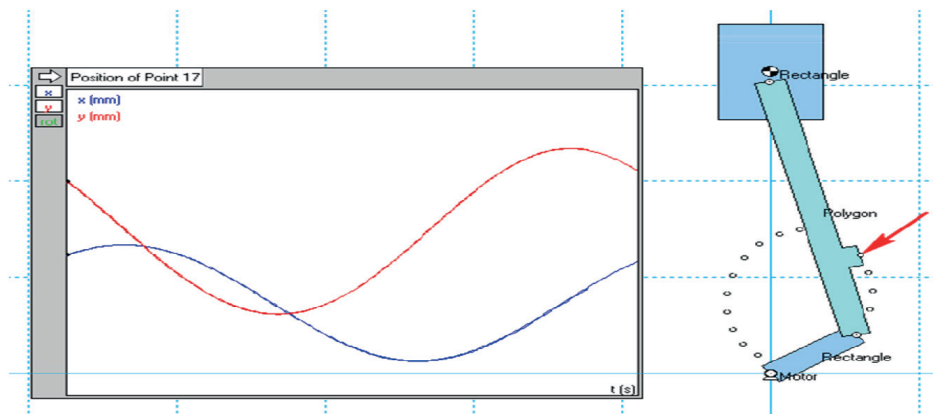


Рис. 3. Фрагмент интерфейса «легкого» программного продукта при исследовании кинематики стержневой модели КШМ с трехмассовым шатуном (положение массы  $m_d$  указано стрелкой)

Система уравнений равновесия шатуна в неподвижной системе координат имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} -N + X_D + X_A &= 0; \\ P_\Sigma - Y_D - Y_A &= 0; \\ NL\cos\beta + P_\Sigma L\sin\beta - X_D(l_{\text{шк}}\cos\beta + l_d\sin\beta) + Y_D(l_{\text{шп}}\sin\beta + l_d\cos\beta - R\sin\alpha) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнения (5) могут быть использованы и для расчета нагрузок на главный шатун КШМ сочлененного типа. При этом замещающие массы должны быть определены по соответствующим формулам (см., например, [5]). Кроме того, размеры модели должны быть определены по соотношениям  $l_{\text{шп}} = L - l_{\text{шк}} = L - r\cos\gamma_l$ ;  $l_{\text{шк}} = r\cos\gamma_l$ ;  $l_d = r\sin\gamma_l$ , где  $r$  и  $\gamma_l$  — соответственно радиус и угол прицепа.

Решение системы (5) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} N &= -P_\Sigma \operatorname{tg}\beta + X_D \frac{l_{\text{шк}}\cos\beta + l_d\sin\beta}{L\cos\beta} - Y_D \frac{l_{\text{шп}}\sin\beta + l_d\cos\beta - R\sin\alpha}{L\cos\beta}; \\ X_A &= -P_\Sigma \operatorname{tg}\beta + X_D \left( \frac{l_{\text{шк}}}{L} + \frac{l_d}{L} \operatorname{tg}\beta - 1 \right) - Y_D \left( \frac{l_{\text{шп}}}{L} \operatorname{tg}\beta + \frac{l_d}{L} + \frac{R\sin\alpha}{L\cos\beta} \right); \\ Y_A &= P_\Sigma - Y_D. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Введем обозначения  $\lambda_{\text{шк}} = l_{\text{шк}}/L$ ;  $\lambda_{\text{шп}} = l_{\text{шп}}/L$ ;  $\lambda_d = l_d/L$ . Тогда уравнения (6) могут быть записаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} N &= -P_\Sigma \operatorname{tg}\beta + X_D (\lambda_{\text{шк}} + \lambda_d \operatorname{tg}\beta) - Y_D \left( \lambda_{\text{шп}} \operatorname{tg}\beta + \lambda_d - \lambda \frac{\sin\alpha}{\cos\beta} \right); \\ X_A &= -P_\Sigma \operatorname{tg}\beta + X_D (\lambda_{\text{шк}} + \lambda_d \operatorname{tg}\beta - 1) - Y_D \left( \lambda_{\text{шп}} \operatorname{tg}\beta + \lambda_d + \lambda \frac{\sin\alpha}{\cos\beta} \right); \\ Y_A &= P_\Sigma - Y_D. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Первое слагаемое в правой части формулы для расчета силы  $N$  (за исключением знака) совпадает с уравнением для расчета этой силы по двухмассовой статической модели шатуна. Знак «минус» объясняется тем, что по формулам (7) определяется сила, действующая на шатун. Известная формула  $N = P_\Sigma \operatorname{tg}\beta$ , приводимая в многочисленных источниках, выражает силу  $N$ , действующую на стенку цилиндра, т. е. кажущееся несовпадение знаков объясняется наличием «действия» и «противодействия».

В таком случае поправка  $\Delta N$ , обусловленная применением динамической модели шатуна, равна

$$\Delta N = \pm X_D (\lambda_{\text{шк}} + \lambda_d \operatorname{tg} \beta) \mp Y_D \left( \lambda_{\text{шк}} \operatorname{tg} \beta + \lambda_d + \lambda \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} \right). \quad (8)$$

Знаки «плюс» у первого слагаемого и «минус» у второго соответствуют поправке силы  $N$ , действующей на шатун, противоположная комбинация знаков — поправке силы, действующей на стенку цилиндра.

Далее найденные силы  $X_A$  и  $Y_A$  проецируются на оси системы координат  $tAz$ . При этом находим выраженные в ней составляющие нагрузки на кривошипную головку шатуна. В результате получим окончательно:

$$t = -P_{\Sigma} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + X_D (\lambda_{\text{шк}} + \lambda_d \operatorname{tg} \beta - 1) \cos \alpha - Y_D \left[ \left( \lambda_{\text{шк}} \operatorname{tg} \beta + \lambda_d + \lambda \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} \right) \cos \alpha - \sin \alpha \right]; \quad (9)$$

$$z = -P_{\Sigma} \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} - X_D (\lambda_{\text{шк}} + \lambda_d \operatorname{tg} \beta - 1) \sin \alpha + Y_D \left[ \left( \lambda_{\text{шк}} \operatorname{tg} \beta + \lambda_d + \lambda \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} \right) \sin \alpha + \cos \alpha \right]. \quad (10)$$

Как и в предыдущем случае, первые слагаемые в равенствах (9) и (10) соответствуют расчету с использованием двухмассовых статических моделей, а остальные слагаемые образуют поправки, обусловленные динамическим характером моделей. О знаке «минус» сказано ранее.

Если в формулах (3) – (9) принять  $l_d = 0$  и  $\lambda_d = 0$ , то полученные таким образом равенства будут соответствовать расчетам с использованием трехмассовой динамической модели КШМ с симметричным шатуном.

При использовании двухмассовой модели шатуна с дополнительным моментом инерции  $i_{\text{доп}}$  его (шатуна) уравнения равновесия примут вид (рис. 2, б):

$$\left. \begin{aligned} -N + X_A &= 0; \\ P_{\Sigma} - Y_A &= 0; \\ NL \cos \beta + P_{\Sigma} L \sin \beta + M_{\text{доп}} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

а их решения в подвижной системе координат запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} t &= -P_{\Sigma} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{M_{\text{доп}}}{L \cos \beta} \cos \alpha; \\ z &= -P_{\Sigma} \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} + \frac{M_{\text{доп}}}{L \cos \beta} \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

### Обсуждение (Discussion)

Сравнение результатов расчета нагрузок на шатунную шейку коленчатого вала (рис. 4, а) показывает, что разница их мгновенных значений для двигателей с несимметричными шатунами может достигать 5 – 8 %. Расчеты показывают, что эта разница увеличивается по мере уменьшения длины шатуна и уменьшения нагрузки. Так, на рис. 4, б показаны векторные диаграммы нагрузок на шатунную шейку вала того же двигателя с укороченным шатуном на режиме прокрутки. Выводы статей [4], [16], где отмечаются преимущества численных расчетов динамики механизмов, в которых используются динамические модели, подтверждают это предположение: описанные аналитические расчеты с использованием динамических моделей практически совпадают с расчетами, выполненными численными методами с применением твердотельных трехмерных моделей.



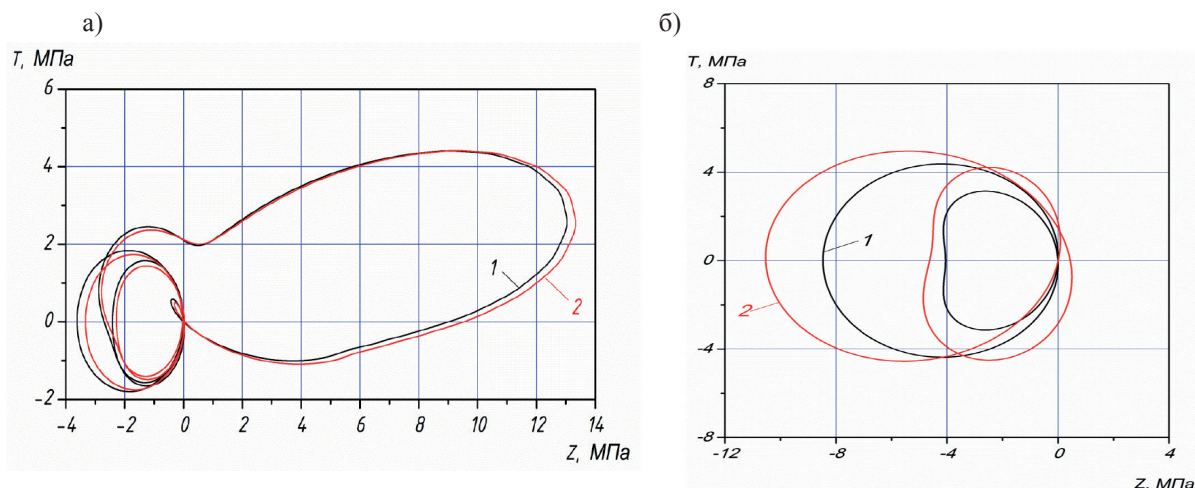


Рис. 4. Векторные диаграммы нагрузок на шатунную шейку:  
а — двигателя ЧН13/14, полученные при использовании двухмассовой статической (1) и трехмассовой динамической (2) моделей шатуна при номинальном режиме работы;  
б — двигателя ЧН13/14 с укороченным шатуном, полученные при использовании двухмассовой статической (1) и трехмассовой динамической (2) моделей шатуна при прокрутке коленчатого вала

### Заключение (Conclusion)

Представляется, что указанное различие результатов (особенно, при современных возможностях вычислительной техники и программного обеспечения) игнорировать нецелесообразно, поэтому следует рекомендовать предлагаемый метод расчета в практике инженерного проектирования.

Использование «тяжелых» программных продуктов, использующих 3D-моделирование, как правило, требует приобретения дорогостоящих лицензий и специальной подготовки пользователей. Освоение студентами «легких» программных продуктов, использующих динамические модели для исследования кинематики и динамики механизмов, может проходить в рамках изучения дисциплин общепрофессиональной подготовки, таких как «Теория машин и механизмов», «Основы инженерного конструирования», «Детали машин».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайнов Н. Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков. — М.: Машиностроение, 2008. — 496 с.
2. Яманин А. И. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении / А. И. Яманин. — М.: Машиностроение, 2005. — 480 с.
3. 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.
4. Горобцов А. С. Расчетные задачи динамики систем твердых и упругих тел в программном комплексе ФРУНД / А. С. Горобцов, С. В. Солоденков // Машиностроение и инженерное образование. — 2008. — № 4. — С. 31–38.
5. Истомин П. А. Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П. А. Истомин. — Л.: Судостроение, 1966. — 280 с.
6. Истомин П. А. Динамические модели кривошипно-шатунных механизмов и их деталей / П. А. Истомин, М. А. Минасян // Двигателестроение. — 1984. — № 9. — С. 20–24.
7. Минасян М. А. Особенности динамики ДВС с несимметричными шатунами: дис. ... канд. техн. наук / М. А. Минасян. — Л.: ЦНИДИ, 1988. — 262 с.
8. Платонов К. Ю. Разработка программного обеспечения динамического анализа кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей внутреннего сгорания на переходных режимах / К. Ю. Платонов,

П. С. Ширинкин, Р. Н. Хмелев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. — 2016. — Т. 3. — № 3 (6). — С. 248–252.

9. Li X. H. Dynamic Analysis of Crank-Connecting Rod-Piston Mechanism of S195 Diesel Engine Based on MATLAB / X. H. Li, X. M. Zhang, X. J. Guo // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — Vol. 490–491. — Pp. 992–996. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.992.

10. Вальехо Мальдонадо П. Р. Реализация процесса проектирования кривошипно-шатунного механизма ДВС в системе AUTODESK INVENTOR / П. Р. Вальехо Мальдонадо, Д. К. Гришин, В. А. Лодня // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. — 2008. — № 2. — С. 85–89.

11. Яманин А. И. Динамические расчеты поршневых двигателей в среде AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL / А. И. Яманин. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2013. — 112 с.

12. Жуков В. А. Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с сцепными шатунами / В. А. Жуков, А. И. Яманин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 2 (36). — С. 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

13. Zhang X. M. Dynamic Simulation of Crank-Connecting Rod-Piston Mechanism of Internal Combustion Engine Based on Virtual Prototype Technology / X. M. Zhang, Y. Q. Wang, J. Fang // *Applied Mechanics and Materials*. — 2012. — Vol. 143–144. Pp. 433–436. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.143-144.433.

14. Liu S. Kinematics and dynamics simulation of a diesel engine's crank-connecting rod-piston mechanism based on virtual prototype technology [J] / S. Liu, H. Chen, X. Chen, S. Yao // *Ship Engineering*. — 2006. — Vol. 3. — Pp. 007.

15. Яманин А. И. Динамический расчет поршневых двигателей в среде Working Model 2D / А. И. Яманин. — Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2015. — 172 с.

16. Хозенюк Н. А. К определению нагруженности коренных опор коленчатого вала / Н. А. Хозенюк, А. А. Мыльников, Д. О. Ключанов // *Наука в ЮУрГУ: матер. 66-й науч. конф.* — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. — С. 355–360.

## REFERENCES

1. Chainov, N.D., N.A. Ivashchenko, A.N. Krasnokutskii, and L.L. Myagkov. *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.: Mashinostroenie, 2008.

2. Yamanin, A.I. *Komp'yuterno-informatsionnye tekhnologii v dvigatelestroenii*. M.: Mashinostroenie, 2005.

3. 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.

4. Gorobtsov, A.S., and S.V. Solodyonkov. "FRUND - the Software Package for the Dynamic Simulation of the Rigid and Flexible Bodies Systems." *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* 4 (2008): 31–38.

5. Istomin, P.A. *Dinamika sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. L.: Sudostroenie, 1966.

6. Istomin, P.A., and M.A. Minasyan. "Dinamicheskie modeli krivoshipno-shatunnykh mekhanizmov i ikh detalei." *Dvigatelsestroenie* 9 (1984): 20–24.

7. Minasyan, M.A. *Osobennosti dinamiki DVS s nesimmetrichnymi shatunami*. PhD diss. L.: TsNIDI, 1988.

8. Platonov, K. Yu., P.S. Shirinkin, and R.N. Khmelev. "Software development for dynamic analysis of the crank mechanism of reciprocating internal combustion engines in transient modes." *Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskoy kompleks: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya* 3.3(6) (2016): 248–252.

9. Li, Xin Hua, Xiao Ming Zhang, and Xiao Jie Guo. "Dynamic analysis of crank-connecting rod-piston mechanism of S195 diesel engine based on MATLAB." *Applied Mechanics and Materials* 490–491 (2014): 992–996.

10. Vallejo Maldonado, P.R., D.K. Grishin, and V.A. Lodnya. "Realization of process of designing ice crankshaft -rod mechanism in autodesk inventor system." 2 (2008): 85–89.

11. Yamanin, A.I. *Dinamicheskie raschety porshnevnykh dvigatelei v srede AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL*. Yaroslavl': Izd-vo YaGTU, 2013.

12. Zhukov, Vladimir Anatolevich, and Alexander Ivanovich Yamanin. "The analysis of algorithms for calculation of kinematics of crankshaft-rod mechanism with the coupled connecting-rods." *Vestnik Gosudarstvennogo*

*universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 2(36) (2016): 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

13. Zhang, Xiao Ming, Yu Qing Wang, and Jie Fang. “Dynamic Simulation of Crank-Connecting Rod-Piston Mechanism of Internal Combustion Engine Based on Virtual Prototype Technology.” *Applied Mechanics and Materials* 143–144 (2012): 433–436. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.143-144.433.

14. Liu, Shao-jun, H. Chen, X. Chen, and S. Yao. “Kinematics and dynamics simulation of a diesel engine’s crank-connecting rod-piston mechanism based on virtual prototype technology [J].” *Ship Engineering* 3 (2006): 007.

15. Yamanin, A. I. *Dinamicheskii raschet porshnevnykh dvigatelei v srede Working Model 2D*. Yaroslavl: Izdat. dom YaGTU, 2015.

16. Khozenyuk, N.A., A.A. Myl’nikov, and D.O. Klyukanov. “K opredeleniyu nagruzhennosti korennykh opor kolenchatogo vala.” *Nauka v YuUrGU: Materialy 66-i nauchnoi konferentsii*. Chelyabinsk: Izdat. tsentr YuUrGU, 2014: 355–360.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Яманин Александр Иванович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный  
технический университет»  
150023, Российская Федерация, Ярославль,  
Московский проспект, 88  
e-mail: [yamaninai@ystu.ru](mailto:yamaninai@ystu.ru), [a\\_yam@mail.ru](mailto:a_yam@mail.ru)  
**Жуков Владимир Анатольевич** —  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7  
e-mail: [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru), [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru)  
**Барышников Сергей Олегович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С.О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7  
e-mail: [BarychnikovSO@gumrf.ru](mailto:BarychnikovSO@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yamanin, Alexander I.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Yaroslavl State Technical University.  
88 Moskovsky Av., Yaroslavl, 150023,  
Russian Federation  
e-mail: [yamaninai@ystu.ru](mailto:yamaninai@ystu.ru),  
[a\\_yam@mail.ru](mailto:a_yam@mail.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: [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru), [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru)  
**Baryshnikov, Sergey O.** —  
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: [BarychnikovSO@gumrf.ru](mailto:BarychnikovSO@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.*

*Received: January 15, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220

## OPERATING FEATURES OF MARINE ENGINES WITH COMMON RAIL FUEL SYSTEM

**G.E. Zhivljuk, A.P. Petrov**

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

*This paper covers the influence of operating characteristics on the development and improvement of technical shape of modern marine reciprocating internal combustion engines. The paper summarizes the experience of exploitation and repair of storage systems of fuel injection with electronic control. The structure of the system, consisting of primary sensors, an electronic control unit (ECU), electronically-controlled injector, a pressure accumulator of the fuel valves, pumps etc. and the main types of failures that occur in service. Introduced the structuring of failures for mechanical devices, fuel injection systems and electronic control devices. Assess the failures and their consequences from the point of view of influence on parameters of energy efficiency and environmental safety. It is shown that from the point of view of resource indicators, the most vulnerable element of the system is the fuel feed nozzle, and in particular, high-speed electronically-controlled valve. Wear of structural elements of the valve leads to increased consumption control fuel. The wear of the injection pump leads to a drop in pump performance and consequently, as described above, wear of injectors, reduce the pressure in the fuel rail. It becomes apparent that the same symptoms of defects makes the diagnosis of the mentioned problems. Since these defects are associated with mechanical causes, the electronic diagnostics of such faults requires a skilled operator considerable experience in repair and sufficiently high intuition. Analysis of technical materials, the study of experience as the leading manufacturer of marine engines MAN Diesel & Turbo has identified key areas of refinement of the design of fuel supply systems. They provide for the application of the principles of modular construction, redundancy of control loops, valve isolation, the use of new materials, and the increased strength of structural elements under the influence of high mechanical loads. An important role for the acquisition of the engine management system by means of automatic, continuous monitoring of the main parameters of the engine and its systems, providing technical support for the operators in the remote access mode.*

*Keywords: power plant, diesel engine, accumulator fuel supply system, electronic control, faults, failures, diagnostics, primary sensors, actuators, modular constructions, redundancy.*

**For citation:**

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Operating features of marine engines with common rail fuel system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 201–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220.

**УДК 621.43.074**

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДАЧИ COMMON RAIL СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Г. Е. Живлюк, А. П. Петров**

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

*Настоящая статья освещает вопросы влияния эксплуатационных особенностей на развитие и совершенствование технического облика современных судовых поршневого двигателей внутреннего сгорания. В работе обобщен опыт эксплуатации и ремонта аккумуляторных систем топливоподачи с электронным управлением. Рассмотрена структура системы, включающая первичные датчики, электронный блок управления электронно-управляемые форсунки, аккумулятор давления топлива, клапаны, насосы и другие механизмы, а также основные виды отказов, возникающие в процессе эксплуатации. Введено структурирование отказов по механическим устройствам топливоподающих систем и электронным устройствам управления. Дана оценка отказов и их последствий с точки зрения влияния на параметры энергетической эффективности и экологической безопасности. Показано, что с точки зрения ресурсных показателей наи-*



более уязвимым элементом системы является топливоподающая форсунка, и, в частности, быстродействующий электронно-управляемый клапан. Износ конструктивных элементов клапана приводит к повышенному расходу управляющего топлива. Износ топливного насоса высокого давления приводит к падению его производительности и, следовательно, как и износ форсунок, к понижению давления в топливной рампе. Становится очевидным, что одинаковые внешние проявления дефектов крайне затрудняют диагностирование указанных неисправностей. Поскольку эти дефекты связаны с механическими причинами, электронное диагностирование таких неисправностей требует от квалифицированного оператора значительного опыта в ремонте и достаточно высокой интуиции. Отмечается, что анализ технических материалов и изучение опыта разработок ведущего производителя судовых двигателей MAN Diesel & Turbo позволили выявить основные направления доводки конструкции систем топливоподачи, предусматривающие применение принципов их модульного построения, резервирование контуров управления, клапанной развязки, применение новых материалов, увеличение прочности элементов конструкций под воздействием повышенных механических нагрузок. Важную роль призвано играть комплектование системы управления двигателем средствами автоматического непрерывного мониторинга основных параметров работы двигателя и его систем, а также обеспечение технической поддержки эксплуатационников в режиме удаленного доступа.

**Ключевые слова:** энергетическая установка, дизельный двигатель, аккумуляторная система топливоподачи, электронное управление, неисправности, отказы, диагностирование, первичные датчики, исполнительные устройства, модульные конструкции, резервирование.

#### Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Эксплуатационные особенности систем топливоподачи *Common Rail* судовых двигателей / Г.Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 201–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-201-220.

### Введение (Introduction)

Развитие двигателестроения обусловлено ужесточением экологических норм и требований экономичности, предъявляемых к судовым двигателям внутреннего сгорания (ДВС). Эти требования вступают в существенное противоречие друг с другом, побуждая исследователей и конструкторов к поиску оптимальных решений при налагаемых ограничениях. Свидетельством этой тенденции является не только дальнейшее ужесточение стандартов выбросов вредных веществ во всем мире, но и создание зон экологической безопасности, имплементация которых обеспечивается прежде всего достижением полного сгорания, что, в свою очередь, обеспечивает низкое содержание вредных веществ в выбросах, экономичность и долговечность конструкций.

Соблюдение существующих и предстоящих норм выбросов с наилучшим возможным расходом топлива становится все более важным фактором успеха судовых ДВС. Особое внимание уделяется работе с низкой нагрузкой на малых частотах вращения. Традиционный впрыск топлива в этом случае является недостаточным для достижения требуемого результата, поскольку процесс впрыска, контролируемый распределительным валом, связан с частотой вращения двигателя. Таким образом, возможности для обеспечения независимого от нагрузки подхода к процессу сгорания очень ограничены.

Проблемы в развитии конструкций и достижении высоких технико-экономических показателей современных дизельных энергетических установок (ДЭУ) решаются благодаря электронному управлению [1], [2] происходящими в них процессами. Процесс топливоподачи наряду с газораспределением в наибольшей степени определяет эффективность работы дизельного двигателя, фиксируя характер протекания тепловыделения в цилиндре двигателя и тем самым эффективность его работы. Возможности управления этими процессами расширяются благодаря интеграции интеллектуальных микропроцессорных систем управления и аккумуляторных систем топливоподачи *Common Rail* двигателей (CRDI). Их возможности, помимо точнейшего формирования законов управления при периодических процессах, позволяют применить адаптацию (самонастройку) систем к случайным воздействиям, обеспечить их самодиагностикой, снабдив элементами FMEA — Failure Mode and Effects Analysis — элементами анализа видов отказов и их последствий.

Современная система включает следующие устройства: первичные датчики (давления, температуры, расхода, положения коленчатого и распределительного валов, частоты и вращения, кон-



троля экологических параметров), электронный блок управления (ЭБУ), электронно-управляемые форсунки, аккумулятор давления топлива (топливная рампа), клапаны, насосы и др. Множество элементов управления иллюстрирует обобщенная блок-схема системы CRDI для легкого топлива, представленная на рис. 1 [3].

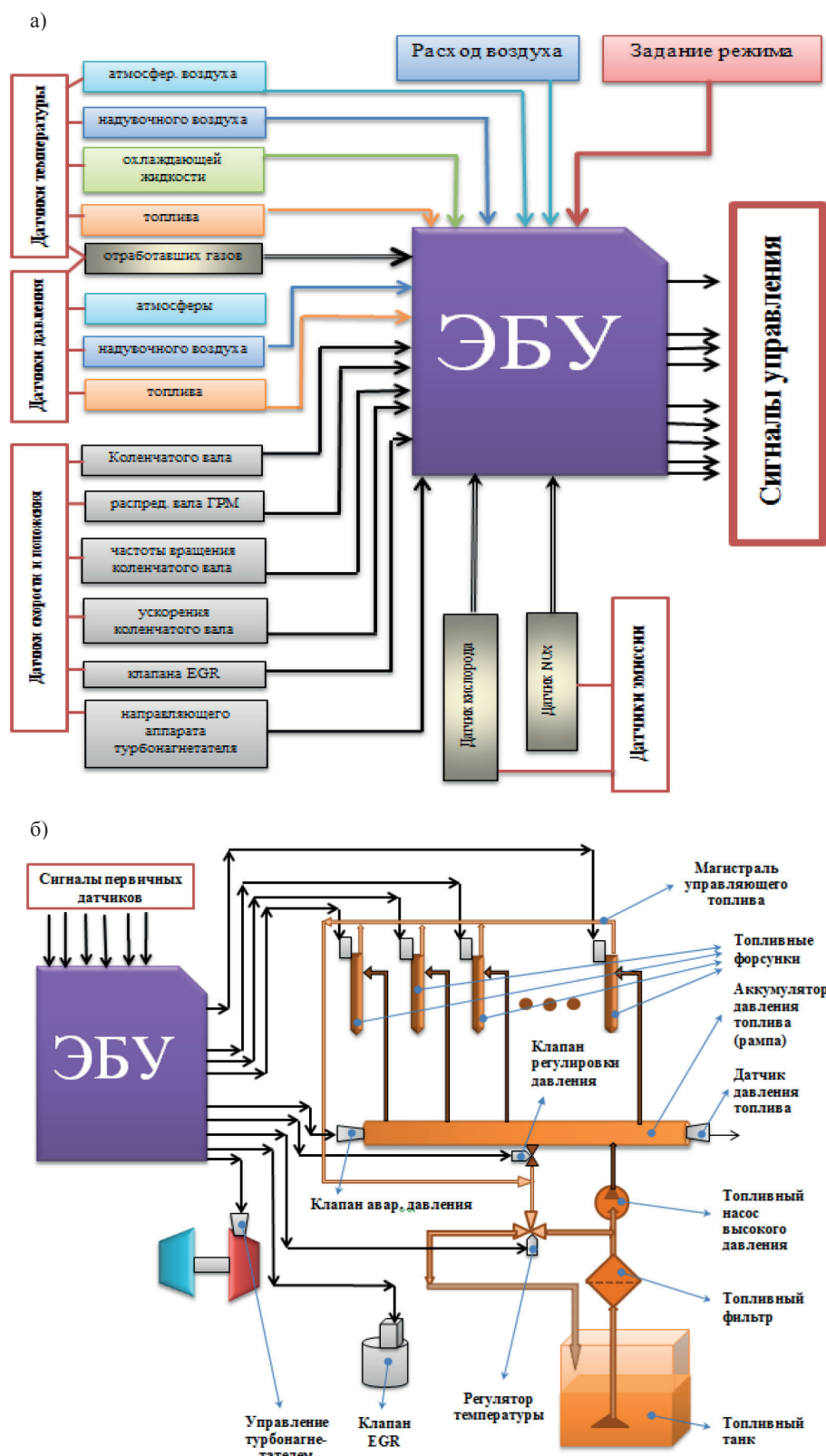


Рис. 1. Система топливоподачи Common RAIL:

а — подсистема сбора и обработки информации первичных датчиков;

б — подсистема электронного управления топливоподачей CRDI

Судовые ДЭУ в значительной степени усваивают опыт береговых установок с системами CRDI. Фирма «Robert Bosch GmbH» с учетом опыта создания, производства и эксплуатации CRDI для двигателей автотранспортного назначения разработала и внедрила целое семейство систем CRDI для судовых дизелей с цилиндровой мощностью до 350 кВт [4], [5]. Данные системы обладают следующими преимуществами, благодаря которым они занимают заслуженное место на рынке этой продукции.

Во-первых, рассматриваемые системы подачи топлива позволяют решить поставленные перед объектами управления задачи путем формирования требуемого для конкретных условий и режима работы двигателя закон подачи топлива, в том числе за счет разделения функций создания давления и времени впрыска.

Во-вторых, применение в топливной форсунке быстродействующего топливного клапана с гидравлической разгрузкой позволяет производить дискретный (дробный) впрыск топлива [5] – [7] разделением подачи топлива в одном цикле топливной форсунки на несколько впрысков следующим образом:

– за счет предварительного впрыска с возможностью реализации практически любого фактора динамичности цикла;

– за счет управляемого дробления основной порции топлива, т. е. требуемых соотношений порций топлива, выделяющих тепло в процессе кинетического и диффузионного сгорания.

В качестве примера на рис. 2 представлена реальная осциллограмма сигнала датчика положения коленчатого вала и управляющего сигнала открытия форсунки на режиме минимальных нагрузок высокооборотного малоразмерного дизельного двигателя «Митсубиси». Из приведенной осциллограммы следует, что закон подачи топлива высокооборотного малоразмерного двигателя для режима, близкого к холостому ходу, формируется тремя импульсами управляющего сигнала форсунки.

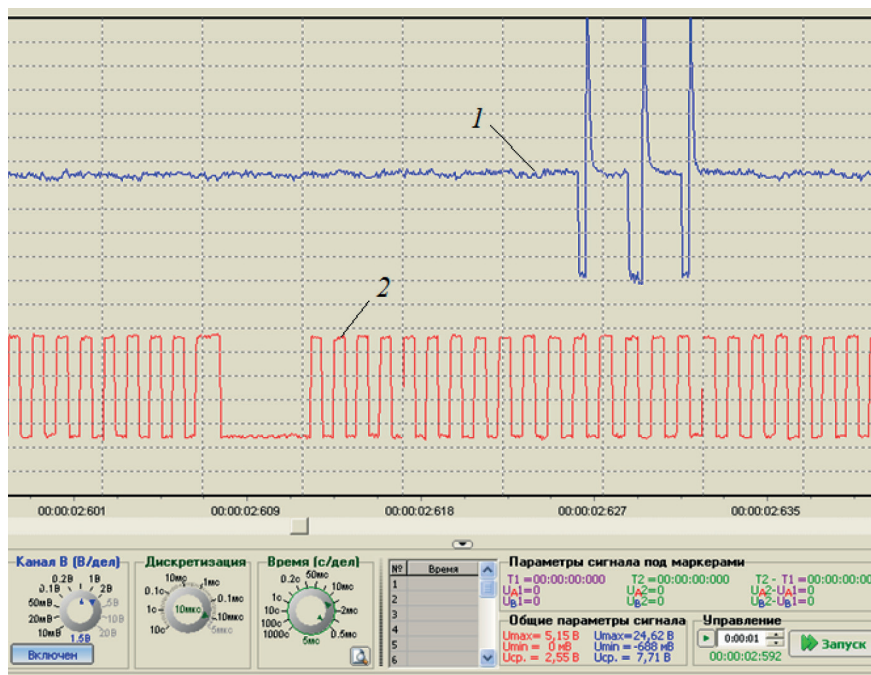


Рис. 2. Осциллограмма сигнала датчика положения коленчатого вала и управляющего сигнала открытия форсунки на режиме минимальных нагрузок:  
1 — управляющий сигнал форсунки; 2 — сигнал датчика положения коленчатого вала

В результате решается такая важная задача, как выравнивание измеренных ускорений вращения коленчатого вала двигателя, возникающих от набегающего крутящего момента каждого цилиндра за счет корректировки цикловой подачи. Таким образом, обеспечивается равномерность распределения нагрузки по цилиндрам двигателя на всех режимах работы двигателя и равномерность вращения коленчатого вала [8].

В-третьих, использование датчиков, устанавливаемых в системе выпуска отработавших газов для анализа их состава, дает возможность обеспечения требуемых на данном этапе экологических характеристик двигателя за счет эффективного влияния на протекание внутрицилиндровых процессов и использования специальных устройств очистки в системе выпуска.

В-четвертых, ЭБУ обладает возможностью самодиагностики системы, направленной на предупреждение возможных отказов в эксплуатации, оповещение оператора и принятия мер по ограничению последствий аварии (Slow Down).

Наконец, алгоритм управления системой CRDI позволяет соблюдать основной принцип алгоритмов создания в виде возможности развития путем перенастройки режимов работы установки и корректировки программного обеспечения ЭБУ.

Эксплуатация оборудования *Common Rail* является самым строгим видом контроля правильности усилий научных работников, конструкторов, производителей и самих пользователей. При этом выявлен ряд следующих недостатков:

- высокая стоимость комплектующих элементов системы, ремонта и обслуживания;
- ограниченные ресурсные показатели;
- необходимость периодического обслуживания системы высококвалифицированным персоналом, выполняющим как механическое обслуживание, так и распознавание ошибок и параметров работы электронных элементов системы;
- высокая требовательность системы к используемому топливу в плане топливоподготовки, его физико-химических характеристик, в особенности к цетановому числу;
- диагностирование и ремонт требуют не только вмешательства специально подготовленного высококвалифицированного персонала, но и наличия весьма специфичного и дорогостоящего оборудования и программного обеспечения.

В предлагаемой публикации авторами на основе собственного опыта и дополнительной информации ремонтных фирм обобщены данные по эксплуатации и ремонту современных ДВС, оборудованных системой CRDI. Рассмотрены и систематизированы основные виды отказов системы CRDI, вызванных как механическими неисправностями топливоподающих устройств, так и потерями работоспособности электронного оборудования системы управления. На примере разработок ведущего производителя судовых и стационарных двигателей MAN Diesel & Turbo показаны пути совершенствования принципиальной схемы компоновки системы топливоподдачи, обусловленные эксплуатационными особенностями.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

### Опыт эксплуатации

Наличие большого числа комплектующих системы обуславливает высокую сложность диагностирования и устранения неисправностей. При этом необходимо разграничивать отказы электронных подсистем, которые выявляются ЭБУ и выдаются в виде протокола ошибок и механических, вызванных в основном износами деталей оборудования в составе системы. Очевидно, что последние влияют и на параметры системы, подлежащие контролю ЭБУ, поэтому точная идентификация такого рода ошибок представляет достаточно большую сложность. В целом распределение механических дефектов и неисправностей электронного оборудования системы распределяется приблизительно поровну (рис. 3).

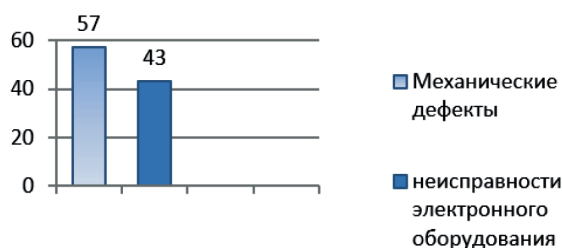


Рис. 3. Распределение отказов системы *Common Rail*

### Основные механические дефекты системы

Как и в традиционной системе топливоподачи, наиболее уязвимыми конструктивными элементами системы CRDI являются форсунка и топливный насос высокого давления. Распределение неисправностей показано на рис. 4.

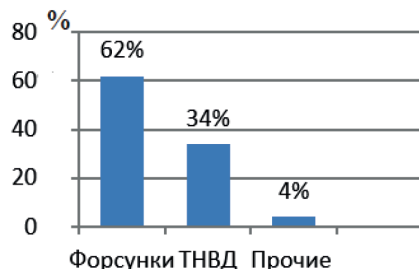


Рис. 4. Распределение механических неисправностей, возникающих в системе *Common Rail*

Опыт эксплуатации двигателей, оснащенных системой CRDI, свидетельствует о том, что с точки зрения ресурсных показателей наиболее уязвимым элементом системы является топливоподающая форсунка, и, в частности, быстродействующий электронно-управляемый клапан. Износ конструктивных элементов клапана приводит к повышенному расходу управляющего топлива. В конечном итоге, повышенный расход управляющего топлива после суммирования с расходом утечного топлива, проникающего через прецизионные узлы форсунки (игла распылителя, управляющий поршень), неизбежно приводит к падению давления в топливной рампе. Для поддержания требуемого давления в рампе (с целью обеспечения параметров топливоподачи) необходимо увеличение производительности топливного насоса высокого давления (ТНВД), которое может быть достигнуто путем изменения времени открытия управляющего клапана давления топлива. В результате электронная система диагностирует искаженную скважность прохождения импульсов управляющего сигнала клапана и идентифицирует ее как ошибку системы, выдавая сигнал оповещения о неисправности.

Кроме того, необходимо отметить, что увеличение расхода управляющего топлива может быть также связано с полным выходом из строя управляющего клапана одной форсунки. В данном случае производится увеличенная подача топлива в цилиндр, способная спровоцировать резкое неконтролируемое увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя (разнос двигателя) или чрезмерную перегрузку данного цилиндра. В этой связи электронный блок управления двигателя рассматривает такую ошибку как фатальную и вводит запрет на дальнейшую эксплуатацию двигателя. Характерный вид износа узла быстродействующего клапана представлен на рис. 5.



Рис. 5. Характерный вид износа седла клапана форсунки (микросъемка)



Следующим по распространенности дефектом является выход из строя топливного насоса высокого давления. Будучи тяжело нагруженным агрегатом, ТНВД склонен к повышенным износам, возникающим в его основных деталях. Дефекты ТНВД, возникающие в процессе эксплуатации, зачастую бывают связаны с низким качеством топлива или плохой топливоподготовкой. В основном это относится к повышенному износу узлов топливоподкачивающей секции, если она конструктивно объединена с ТНВД, и к потере герметичности клапанов насоса. Очень часто продукты износа топливного насоса высокого давления приводят к выходу из строя форсунок системы ввиду попадания продуктов износа в проточные части и зазоры прецизионных пар конструктивных элементов форсунок. На практике такие разрушения можно выявить визуально, поскольку продукты износа можно рассмотреть в топливе перед форсунками в виде мельчайших фрагментов с характерным металлическим блеском.

Износ ТНВД выражается в падении производительности насоса и, следовательно, как и ранее описанный износ форсунок, в понижении давления в топливной рампе. Очевидно, что одинаковые внешние проявления дефектов крайне затрудняют диагностирование указанных неисправностей. Принимая во внимание тот факт, что эти дефекты связаны с механическими причинами, электронное диагностирование таких неисправностей требует от квалифицированного оператора значительного опыта в проведении ремонта и достаточно высокой профессиональной проницательности. Наиболее распространенным способом диагностики неисправности форсунок системы *Common Rail* является измерение расхода управляющего топлива и сопоставление его с расходом управляющего топлива эталонной форсункой в характерном режиме настройки.

Оставшаяся часть механических дефектов систем CRDI, отнесенная к прочим, характерна не только для рассматриваемой системы топливоподдачи, но и для всех известных систем более ранних поколений. К ним следует отнести следующие: потерю работоспособности конструкции уплотнений трубок высокого давления; разрушение элементов привода ТНВД; износ распылителей форсунок; потерю герметичности топливных магистралей низкого давления и др. Как правило, в большинстве случаев эти дефекты обусловлены неквалифицированными действиями ремонтного или обслуживающего персонала.

Кроме того, необходимо отметить, что сложная геометрия трубопроводов, каналов, соединений и переходов системы CRDI при высоком давлении создает предпосылки для усталостного разрушения [9], [10]. Для повышения предельного давления в полых толстостенных оболочках, которыми насыщена система CRDI, на практике используется так называемое *автофреттирование*. Его технология заключается в том, что полая толстостенная оболочка нагружается давлением, при котором возникает область пластической деформации. После снятия нагрузки в оболочке возникает поле остаточных напряжений. Если оболочку вновь нагрузить, то предельное давление, соответствующее появлению пластических деформаций, повысится.

Решение проблем повышения износостойкости отдельных тяжело нагруженных элементов системы, в частности узла быстродействующего клапана управления подачей топлива, возможно благодаря использованию специальных неметаллических материалов на основе безоксидной керамики [8]. Вместе с тем изучение механики разрушения и усталостной прочности системы связано с рядом проблем. Некоторые из них в части трещинообразования необходимо решить в ближайшем будущем.

#### *Неисправности электронного оборудования*

Рассматривая вопросы неисправностей, связанных с дефектами электронного оборудования, необходимо принять во внимание условия работы электронных элементов системы (датчиков и исполнительных устройств), расположенных на двигателе. Элементы системы, размещаемые на двигателе, подвержены воздействию агрессивных сред (масло, топливо, охлаждающие жидкости), высоких температур и, что немаловажно, высоким уровням вибрации. Совокупность этих



факторов и является основной причиной выхода их из строя. Так, вибрации вызывают разрушение изоляции и возникновение замыканий в датчиках, воздействие высоких температур приводит к потере работоспособности уплотнений разъемов датчиков к линиям связи с электронным блоком управления, а воздействие агрессивных сред влечет за собой не только нарушение контактов в подключениях, но и разрушение материалов, из которых изготавливаются изоляционные покрытия проводов и сами электрические разъемы (рис. 6).

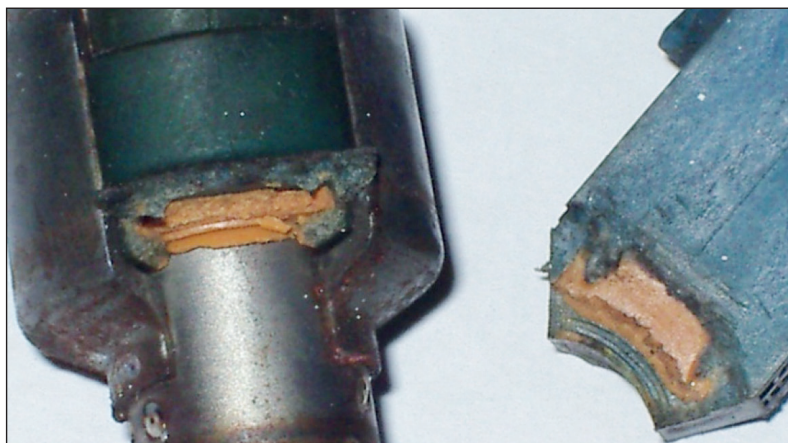


Рис. 6. Разрушение разъема под действием высокотемпературных агрессивных сред

Похожие дефекты имели место в распределительных коробках в результате касания и истирания изоляции проводов о внутренние поверхности коробки, а также нарушения изоляции из-за вибрации в уплотнительных элементах подвода (отвода) проводов. Кроме того, прохождение высокочастотных сигналов может быть связано с образованием наводок в линиях, поэтому производителями систем предпринимаются меры по экранированию проводов критических линий связи.

Наибольшая доля отказов электронного оборудования (72 %) приходится на измерительную (датчики) и исполнительную (исполнительные устройства) части системы управления. Более уязвимой частью ЭБУ являются периферийные «силовые ключи», выход из строя которых обусловлен формированием и прохождением мощных сигналов, управляющих исполнительными устройствами. Значительная часть неисправностей (21 %) приходится на каналы связи, включая разъемы. Среди прочих (7 %) наиболее редкими представляются сбои в работе ЭБУ. В первую очередь, это связано с относительно простым программным обеспечением системы, обладающим высокой степенью надежности. Однако попытки неквалифицированного вмешательства в программное обеспечение с целью изменения параметров настройки двигателя приводят к отказам в работе или некорректному формированию отдельных управляющих сигналов. Несмотря на значительное многообразие дефектов электронных систем, возникшие неисправности достаточно точно могут быть идентифицированы путем «чтения» накопленных ошибок из памяти ЭБУ специальными ремонтно-диагностическими устройствами — сканерами.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение наиболее часто встречающихся дефектов электронных систем, к которым следует отнести неисправности первичных датчиков и исполнительных устройств, размещенных на двигателе и в его системах (рис. 7). Наиболее уязвимыми, как показывает практика, оказываются датчики и управляющие клапаны системы высокого давления, в том числе клапаны предельного давления (если система оборудована таковыми). Достаточно часто возникновение неисправностей обнаруживается в исполнительных механизмах систем рециркуляции отработавших газов (клапаны EGR) и систем управления направляющим аппаратом турбины турбокомпрессора. При этом необходимо уточнить, что эти неисправности могут быть отнесены к дефектам электронных систем лишь частично, поскольку первоисточником их в большинстве случаев служат механические причины.

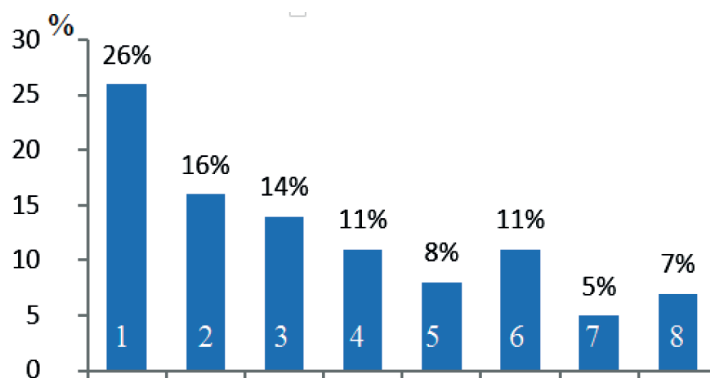


Рис. 7. Неисправности первичных датчиков и исполнительных устройств:  
1 — клапаны и датчики управления; 2 — расходомер воздуха; 3 — клапан EGR;  
4 — механизм управления; 5 — датчики положения и частоты вращения; 6 — датчики контроля;  
7 — устройства управления; 8 — прочие устройства

Среди неисправностей первичных датчиков, в первую очередь, необходимо отметить относительно высокую частоту выхода из строя датчика расхода воздуха. Это первично выражается в искажении показаний и, в конечном итоге, приводит к полной потере работоспособности. Далее по порядку следуют неисправности датчиков положения и скорости коленчатого и распределительных валов. Это отмечается вне зависимости от конструкции (датчик Холла, индуктивный датчик) как по причине разрушения обмоток, так и по причине выхода из строя преобразователей сигнала.

В отдельную группу неисправностей на диаграмме (см. рис. 7) вынесены датчики обеспечения экологической безопасности силовой установки. К ней относятся датчики температуры отработавших газов, датчики дифференциального давления сажевого фильтра, датчики  $\text{NO}_x$  и связанные с ними устройства регулирования подачи мочевины в систему селективной каталитической очистки отработавших газов и др. Выход из строя этих датчиков, в первую очередь, связан со специфическими условиями их работы, выраженными в высоких значениях температуры окружающих агрессивных сред, высокой скорости и импульсивности потоков измеряемых сред и т. д.

В современных системах CRDI применяются два основных вида исполнительных устройств электронного управления клапаном форсунки, основанных на использовании электромагнитов и пьезокристаллов. Первое поколение форсунок с электромагнитными клапанами обеспечивало высокую работоспособность системы, поэтому отказы электромагнитов были чрезвычайно редкими. При этом основным существенным недостатком такой конструкции являлось недостаточное быстродействие клапана. Данный недостаток первых поколений форсунок успешно решает использование в конструкции пьезоэффекта. Применение пьезокристаллов в качестве силового управляющего звена позволяет существенно повысить быстродействие клапана форсунки и открывает более широкие возможности по управлению топливоподачей. При этом необходимо отметить, что пьезокристалл не отличается длительной работоспособностью и вызывает отказы в работе форсунок данного типа.

#### *Особенности совершенствования принципиальной схемы компоновки системы*

В ряде случаев существующий эксплуатационный опыт вызывает необходимость помимо подетального подхода к доводке конструкции любой системы рассмотреть возможности самой системы с точки зрения её эффективности, надежности и подверженности дальнейшей модернизации.

Обратимся к опыту фирмы MAN Diesel & Turbo [7] и оценим её шаги по совершенствованию архитектуры системы CRDI, которая спроектирована для работы на тяжелом топливе HFO. В дополнение к высокой вязкости это топливо также обычно имеет высокое содержание

абразивных частиц и очень агрессивных химических компонентов. Система впрыска должна выдерживать эти условия безотказным способом, включая запуск и останов двигателя во время его работы на НФО.

Специфические условия эксплуатации судовых дизелей вступают в коренное противоречие с концепцией общего аккумулятора давления — топливной рампой, получившей широкое распространение в конструкции системы малоразмерных двигателей, работающих на легком дизельном топливе. Противоречия относятся как к общетеоретическим, конструкционным, технологическим, так и к логистическим аспектам эксплуатации системы CRDI на крупных судовых ДВС. Так, различные виды топлива, которые должен использовать двигатель, определяют широкий температурный диапазон по топливу:  $-25 \dots 150$  °С. Это, в свою очередь, вызывает существенное различие в линейном тепловом расширении общей рампы, создавая высокие термические напряжения в конструкции, которые суммируясь с механическими напряжениями от давления топлива, способны превысить предел прочности материала. Одновременно длинная рампа конструктивно нуждается в соединениях с каждым цилиндром. В этом случае неизбежно возникновение и распределение по корпусу дополнительных концентраторов напряжений, существенно снижающих надежность узла и системы в целом.

Крайне важным является также тот факт, что в отличие от массовой программы выпуска малоразмерных двигателей транспортного назначения, производство типоразмерных рядов крупных судовых двигателей потребует в условиях мелкосерийного производства значительных затрат на индивидуальную разработку и доводку конструкции общего аккумулятора для каждой модификации двигателя. Поэтому стоимость системы может оказаться неоправданно высокой.

Рост цилиндровой мощности двигателей при больших цикловых подачах топлива приводит к использованию аккумулятора большого объема. Возникающие при этом проблемы и принимаемые контрмеры приближенно пропорциональны увеличению внутреннего диаметра рампы.

Сохранение объема аккумулятора создает проблемы в достижении стабильных параметров впрыска топлива по цилиндрам, также затруднительно решение основной задачи аккумуляторной системы, направленной на исключение колебаний давления в системе для всех цилиндров двигателя. Кроме того, внедрение аккумулятора чрезмерной длины неизбежно превратит его в объект управления с распределенными параметрами уже с другими особенностями процесса впрыска в удаленные от насоса цилиндры.

Исходя из этого разработчики MAN Diesel & Turbo внедряют концепцию сегментирования, разделяя аккумулятор на несколько блоков подходящего объема и применяют, по крайней мере, два насоса высокого давления для шестицилиндрового двигателя. На основе концепции сегментированных рамп, фирмой MAN Diesel & Turbo разработана модульная система CRDI, применяемая к нескольким типам двигателей [6], [7], [8], [12] — рис. 8. Еще одним преимуществом этой сегментации является повышенная гибкость при адаптации CRDI системы к различным количествам цилиндров, что также является интересным случаем, когда рассматриваются модифицированные конструкции двигателей. Например, семицилиндровый двигатель поставляется с четырьмя блоками, когда три блока рамп снабжают каждые два цилиндра и один цилиндр снабжен индивидуальным блоком рампы. Более компактный дизайн блоков CRDI обеспечивает более эффективное использование доступного пространства на двигателе, что удобно для сборки, а также выявляет преимущества в хранении запасных частей.

Пример сегментирования схемы CRDI по модулям дан на рис. 9. Чтобы гарантировать равномерную подачу топлива, колебания давления в системе должны оставаться на очень низком уровне. Это достигается за счет использования блоков рамп оптимального объема, нескольких (от двух до четырех) насосов высокого давления вместо одного насоса, и распределительного вала с высокоточным профилем и расположением тройного кулачка для оптимального привода. Таким образом, обеспечивается высокий равномерный объем подачи топлива по цилиндрам при одновременном ограничении колебания давления в аккумуляторах.

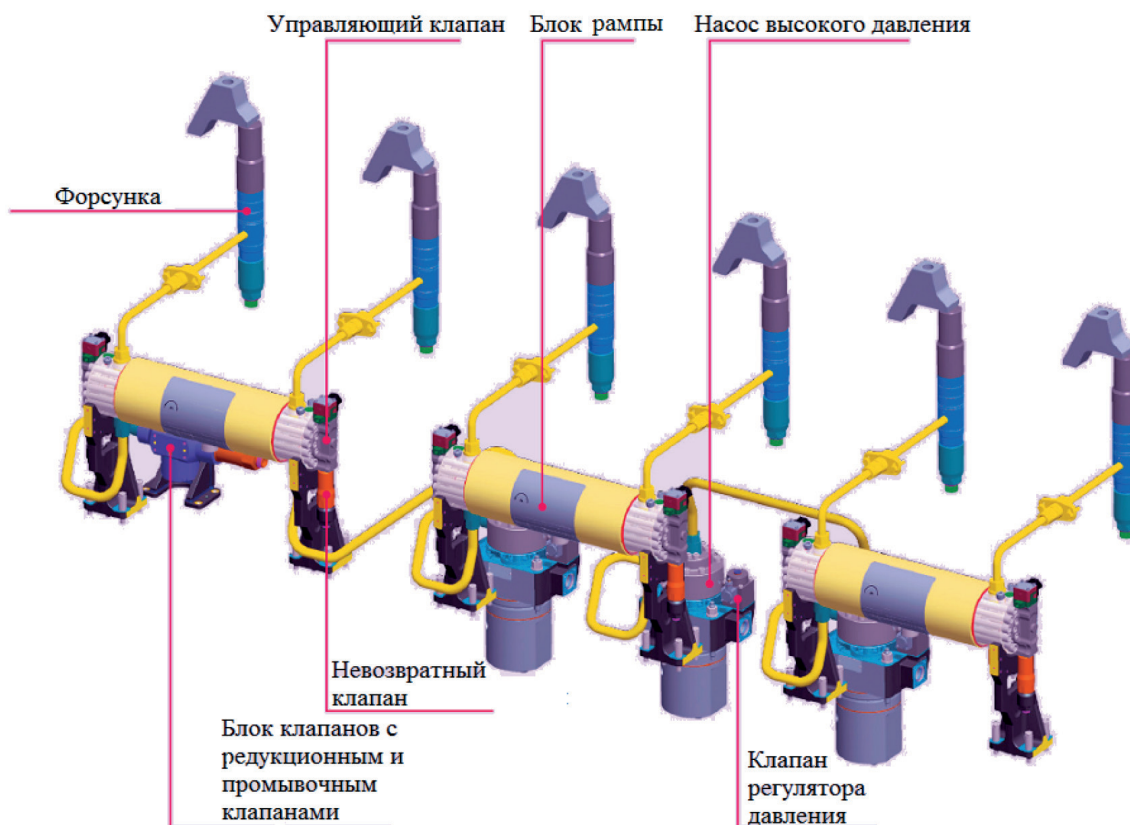


Рис. 8. Система топливоподачи CRDI двигателя MAN 32/44 CR

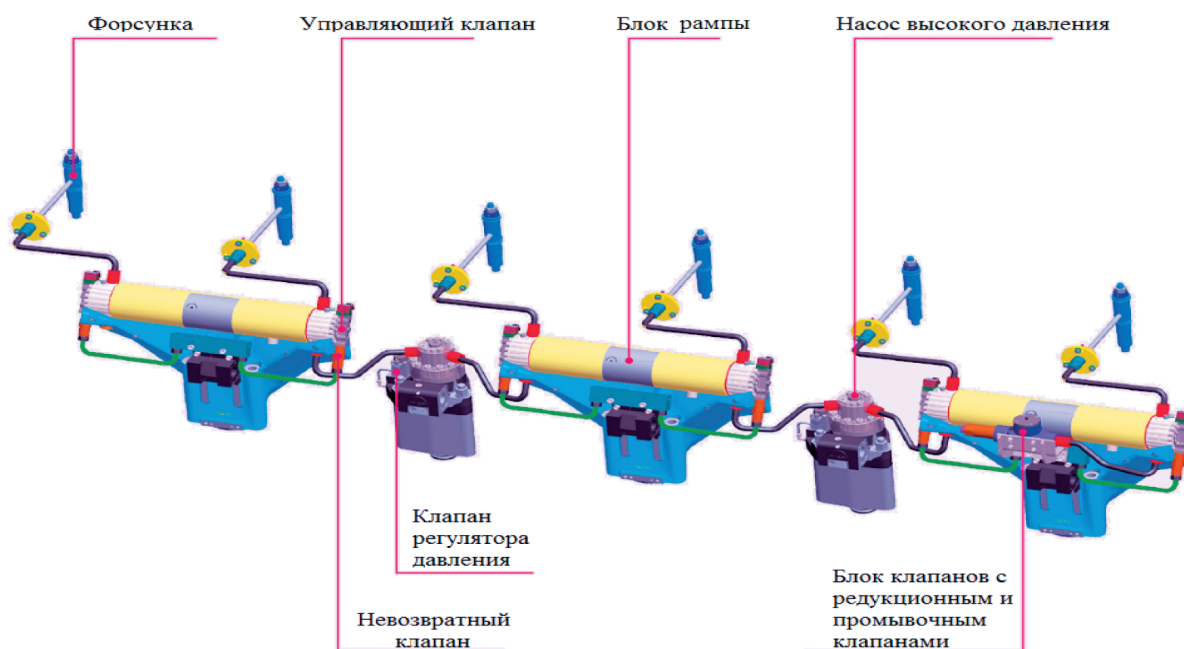


Рис. 9. Система топливоподачи CR двигателя MAN 48/60 CR

Поддержание заданного давления в рампе производится клапанами регуляторов давления путем дросселирования потока топлива к насосам высокого давления. При этом давление в рампах рассчитывается с помощью характеристической карты в управлении впрыском в зависимости от нагрузки двигателя.



На рис. 10 показана гидравлическая компоновка впрыска мазута в CR для двигателя MAN 32/ 44CR. Топливо через электромагнитные дроссельные клапана 1 и всасывающие клапана 2 поступает к насосам высокого давления 3, которые снабжают блоки рампы 5 топливом с высоким давлением до 1600 бар посредством нагнетательных клапанов 4. Блоки рампы 5, которые функционируют как аккумуляторы давления и объема топлива, изготовлены из высокопрочной трубы, закрытой торцевыми крышками, в которые встроены управляющий клапан 6. Управляющие клапаны 7 закреплены на его держателе. Соединения для трубы высокого давления расположены в радиальном направлении на держателе управляющего клапана; эти связи подводят топливо к форсункам 8, а также к следующему блоку рампы. Такая конструкция означает, что сама труба блока не требует сверления и поэтому обладает высокой устойчивостью к давлению топлива.

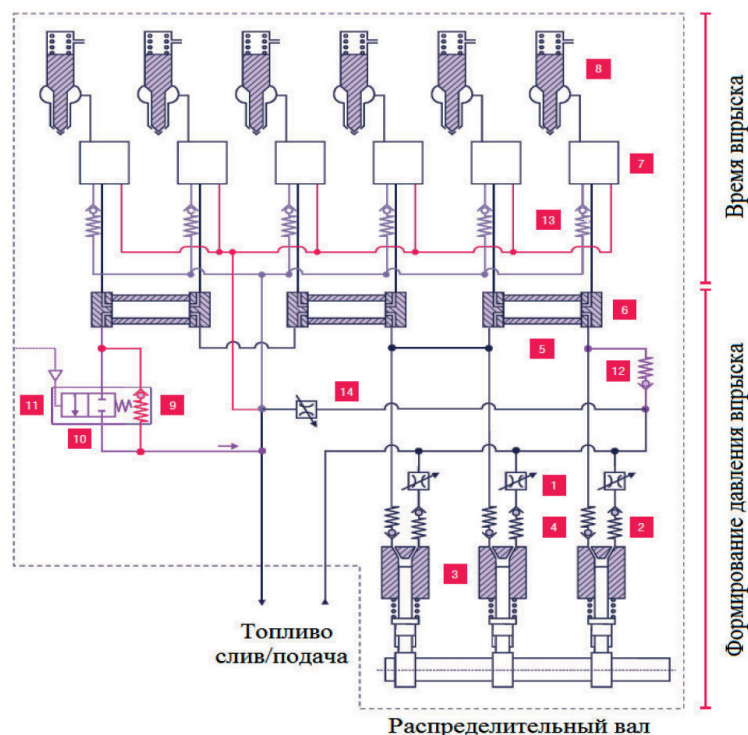


Рис. 10. Схема системы CR для двигателя MAN 32/44 CR

Функциональные утечки топлива, возникающие в процессе контроля 3/2-ходового клапана сбрасываются назад в систему низкого давления через обратный клапан (см. рис. 10 и 11). Обратный клапан 13 (см. рис. 10) также предотвращает обратный поток от низкого давления системы в цилиндр, например, в случае зависания иглы распылителя. Ограничение давления клапаном 9, расположенным на клапане 10, защищает систему высокого давления от перегрузки (см. рис. 10).

Специфически важное значение эксплуатационных особенностей двигателей, работающих на тяжелых топливах HFO, заключается в их пуске и останове. Система подачи тяжелого топлива CRDI снабжена системой предварительного циркуляционного нагрева, которая позволяет остановить и впоследствии запустить двигатель при работе на HFO без перехода на MDO.

Для запуска холодного двигателя на HFO часть элементов системы высокого давления CRDI предварительно подготавливается путем циркуляции предварительно нагретого HFO из системы низкого давления. Для этой цели промывочный клапан 11 (см. рис. 10), расположенный на клапане 10 в торце рампных блоков, снабжен возможностью пневматического управления. При открытии клапана любое остаточное высокое давление в системе уменьшается и топливо проходит через насосы высокого давления 3 к аккумуляторам 5, одновременно нагретое топливо подается через невозвратный клапан 12 (байпас для обеспечения более высокой скорости потока). После прогрева системы топливо сливается в tanks суточного запаса. Кратность циркуляции топлива в режиме



прогрева системы регулируется с помощью дроссельной заслонки клапана 14. В случае аварийной остановки, технического обслуживания или останова двигателя промывочный клапан 11 обеспечивает поддержание минимального давления для всей системы высокого давления.

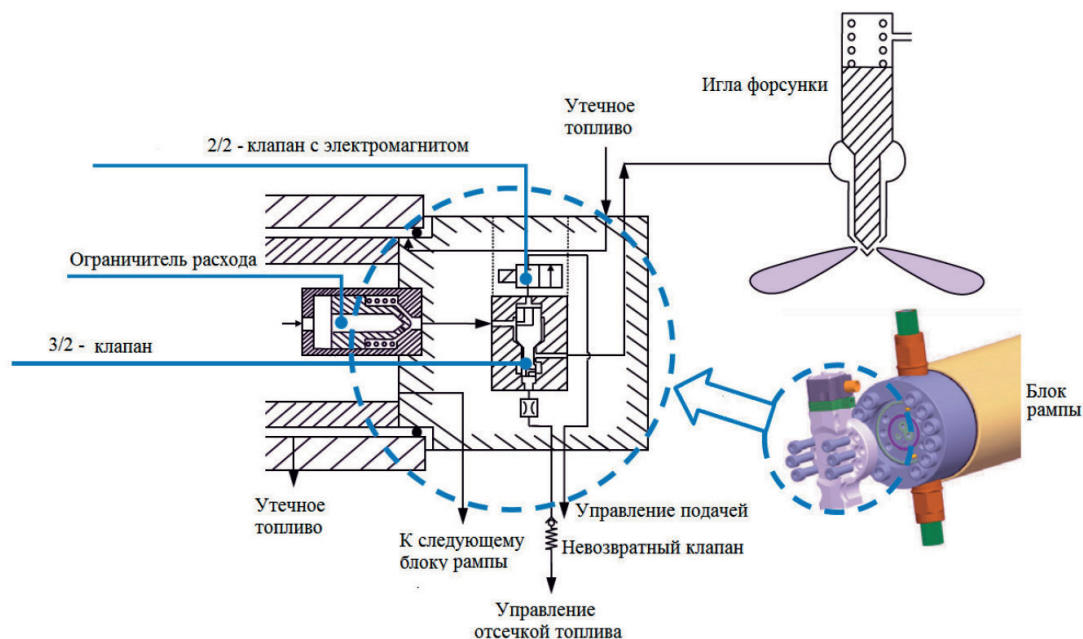


Рис. 11. Компоненты рамного блока для управления количеством и временем подачи топлива

Для оперативного и точного обнаружения возможных утечек топлива в системе высокого давления основные элементы (рампы и трубы высокого давления) снабжены двойными стенками. Пространства между стенками труб связаны между собой и образуют вместе с емкостными датчиками (рис. 12) и установочными винтами (рис. 13) эффективную систему обнаружения утечек.

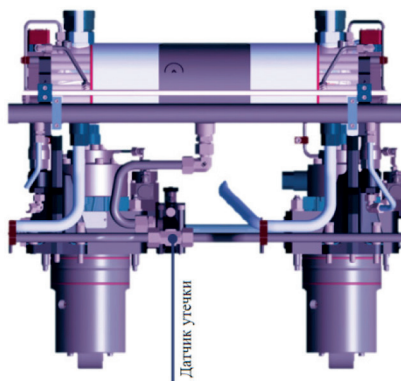


Рис. 12. Система обнаружения утечек (Leakage Detection System — LDS)

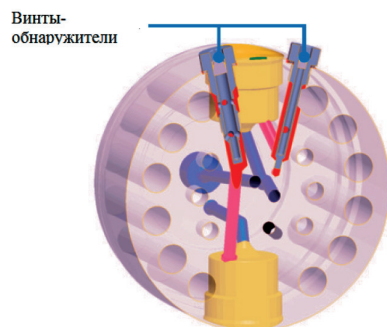


Рис. 13. Система обнаружения утечек: винты-обнаружители / детекторы утечек

Основным преимуществом впрыска в CRDI является гибкость, получаемая путем разделения генерации давления и управления впрыском. Накопленный опыт конструирования и эксплуатации позволяет MAN Diesel & Turbo на основе положительных результатов испытаний осуществлять совершенствование конструкции электронно-управляемых систем впрыска топлива, обеспечивая оптимизацию конструкции, надежность элементов и гармонизацию параметров двигателя. Так, например, в системе CRDI последнего поколения нет отдельной схемы сервопривода для привода клапанов впрыска. Схема подачи топлива через клапаны высокого давления и управляющие клапаны интегрирована в рамные блоки вдали от нагретых головок цилиндров, в результате чего обеспечивается большая надежность системы в процессе эксплуатации.

Различные типы двигателей MAN Diesel & Turbo используют схожую конструкцию системы CRDI. Например, одни и те же базовые конструкции 2/2- и 3/2-ходовых клапанов используются для всех вариантов морского исполнения, а MAN 32 / 44CR выпускается и для стационарных установок (рис. 14). В результате использования 3/2-ходовых клапанов впрыскивающие клапаны находятся под давлением только во время впрыска. Это позволяет избежать неконтролируемого впрыска, даже если управляющий клапан или клапан впрыска подтекают.



Рис. 14. Система *Common Rail* на двигателе MAN V32/44CR

Высокая точность изготовления компонентов системы CRDI обуславливает повышенные требования к дисперсности фильтрации топлива. В целях предотвращения преждевременных отказов, вызванных повреждениями деталей системы твердыми частицами, содержащимися в топливе, в сети низкого давления дополнительно устанавливается 10-мкм автоматический фильтр мазута HFO, который уменьшает износ и стабилизирует срок службы компонентов CRDI (рис. 15).



Рис. 15. Дополнительный 10-мкм автоматический фильтр в бустерном контуре системы подачи мазута HFO

Двигатели, оснащенные технологией CRDI, и, следовательно, имеющие оптимизированный процесс сгорания, имеют наилучший потенциал для удовлетворения более строгих требований к ограничению выбросов вредных веществ, которые могут быть введены в будущем, с наилучшим возможным расходом топлива. Конструкция гарантирует, что дымность отработавших газов остаётся ниже предела видимости даже в случае экстремально низкой нагрузки (рис. 16). Независимо от назначения двигателя (судовой или стационарный), стоимость жизненного цикла установки с CRDI сравнима с аналогичными агрегатами, оснащенными традиционной системой топливоподачи.

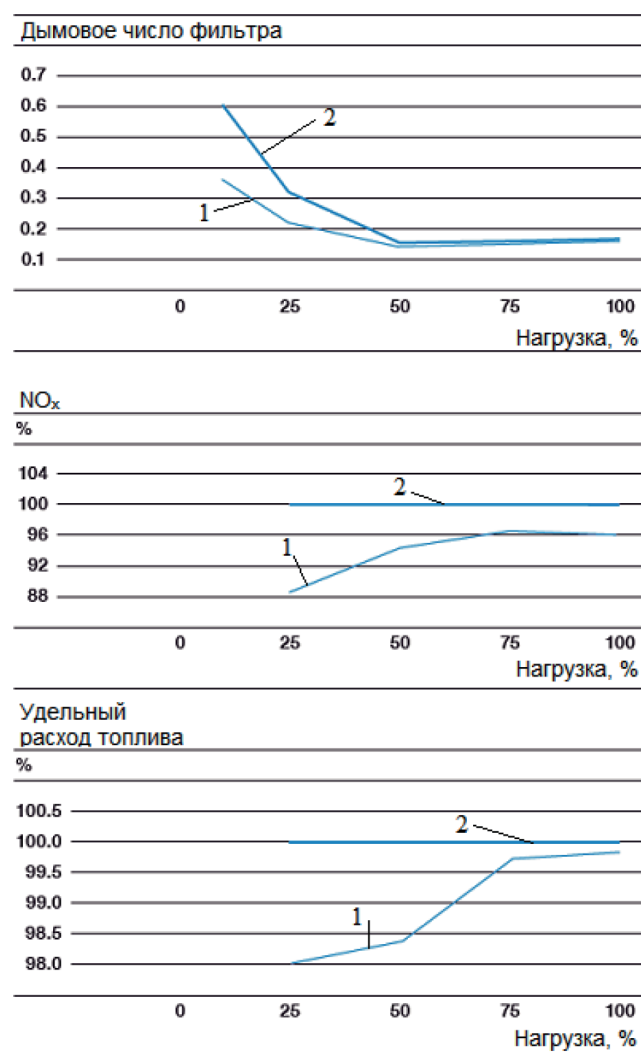


Рис. 16. Сопоставление характеристик двигателя с системой CRDI и традиционной системой топливоподачи:

1 — двигатель с системой CRDI;  
2 — базовый двигатель с традиционной системой топливоподачи

Безопасность при проектировании и эксплуатации является одним из наиболее важных факторов, особенно для судовых двигателей. Задача достижения высокой надежности охватывает все эксплуатационные аспекты, включая электронное оборудование системы CRDI. Основываясь более чем на 15-летнем (с 2001 г.) опыте разработки, эксплуатации и совершенствования аккумуляторных электронно-управляемых систем топливоподачи и используя ранее упомянутую подсистему анализа видов отказов и их последствий FMEA, MAN Diesel & Turbo успешно внедряет собственную концепцию безопасности. Относительно электронного оборудования системы задача заключается в разработке простой избыточной электронной системы CRDI.

Для однодвигательных установок классификационные общества требуют полной избыточной компоновки системы. Поэтому электроника для топливоподачи структурирована следующим образом. Контроллер CRDI полностью интегрирован в SaCoSone (Safety and Control System on Engine — система безопасности и управления двигателем). Данная система предусматривает использование двух модулей ЭБУ (рис. 17). После каждой остановки двигателя функция управления изменяется между двумя подключенными модулями, сохраняя при этом полную функциональность. В случае неисправности активного модуля впрыска резервный модуль берет управление на себя в течение миллисекунд. Все необходимые датчики, источник питания и система цепей питания шины являются резервируемыми / дублирующими по конструкции. Таким образом, одиночный отказ не приведет к отключению двигателя. С помощью резервной CAN-шины вся необходимая информация обменивается между устройствами SaCoSone и отображается на интерфейсе. Для многодвигательной установки возможна нестандартная конструкция системы управления CRDI. Электроника CRDI расширяет возможности обычного впрыска с помощью его свободно регулируемых параметров. Множество характеристических карт и параметров управления впрыском позволяют оптимизировать работу двигателя во всем диапазоне нагрузок.

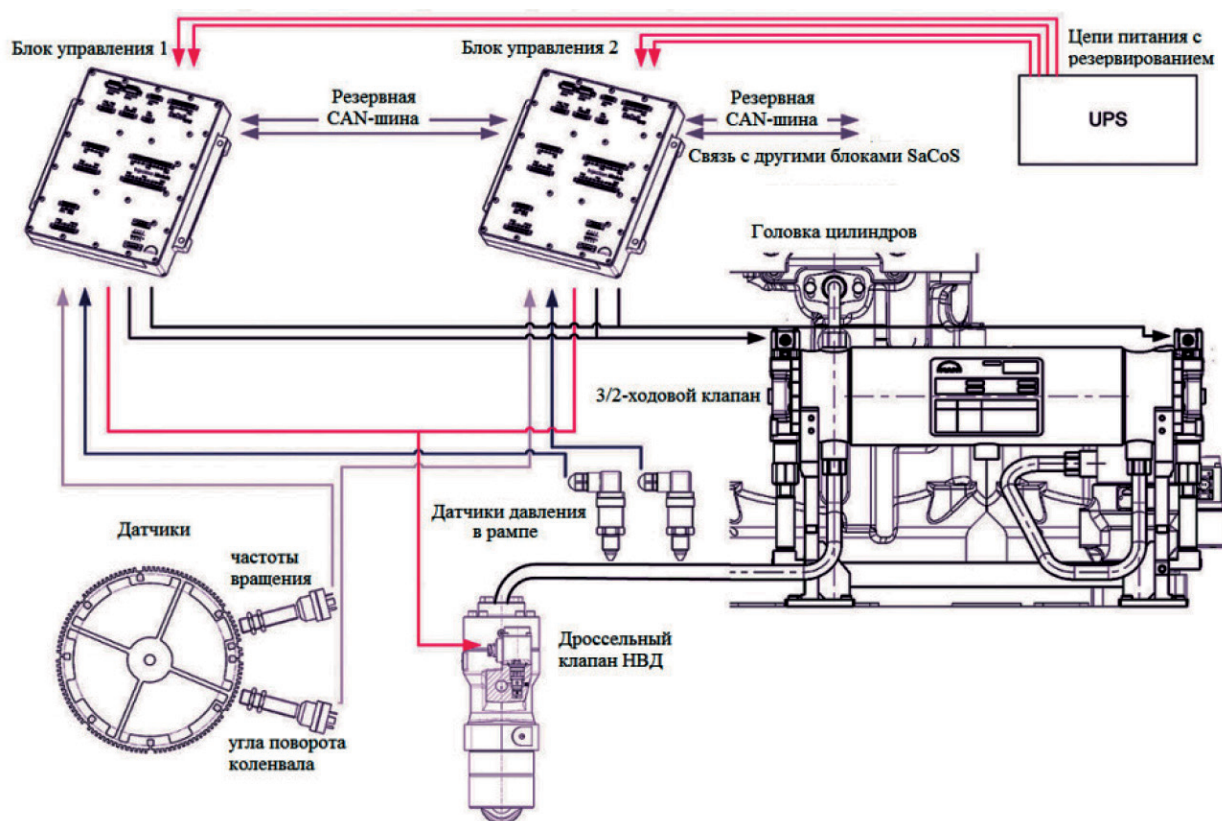


Рис. 17. Резервирование электронной системы управления

Кроме того, система электронного управления поддерживает и обеспечивает использование пакета PrimeServ Online Service, который способен автоматически и непрерывно в режиме online контролировать основные параметры работы системы CRDI и двигателя (рис. 18).

Эксперты MAN PrimeServ анализируют данные двигателя и дают ценные рекомендации по техническому обслуживанию, эксплуатации и ремонту двигателя. При возникновении нарушений заказчик будет немедленно проинформирован об этом, что позволит избежать длительных простоев. Также при необходимости эксперты могут поддерживать клиента при поиске и устранении неисправностей с помощью удаленного доступа.





Рис. 18. Online-сервис MAN Diesel & Turbo

На опыте разработок современных систем топливоподачи CRDI ведущим производителем двигателей судового назначения MAN Diesel & Turbo рассмотрены эксплуатационные особенности и их влияние на совершенствование конструкции энергетических установок. В качестве наиболее важных достижений необходимо выделить следующие:

- использование модульных принципов построения системы CRDI позволяют достичь высокой надежности элементов и системы в целом, обеспечить гибкость системы к адаптации в конструкции типоразмерного ряда двигателей, а также удобство хранения ЗИП системы;
- ввиду того, что форсунки находятся под давлением только во время подачи топлива в цилиндр, отсутствует опасность неконтролируемого впрыска даже в случае потери герметичности управляющих клапанов;
- внедрение в конструкцию компонентов высокого давления с двойной стенкой предопределяет отсутствие опасности протечки топлива в случае разрушений уплотнительных элементов или обрывов труб высокого давления;
- клапаны ограничения потока для каждого цилиндра минимизируют опасности чрезмерного количества впрыскиваемого топлива даже в случае утечки или сломанных компонентов;
- использование в схемном решении системы CRDI индивидуальных обратных клапанов предотвращает обратный поток из системы низкого давления в цилиндр в случае зависания иглы распылителя;
- дублирование топливных насосов высокого давления в системе CRDI предоставляет возможность аварийной работы двигателя при отказе одного из насосов;
- аварийная работа дизеля возможна даже в случае любого отказа подсистемы мониторинга давления в аккумуляторе благодаря дополнительной функции контроля давления предохранительным клапаном ограничения давления;
- в случае возникновения чрезвычайной ситуации двигатель может быть остановлен пневмоуправляемым промысловым клапаном, принимающим на себя дополнительные функции клапана аварийного останова;
- задействование принципов резервирования электронных элементов системы CRDI способно обеспечить бесперебойную работу энергетической установки даже в случае отказа основных датчиков системы или ЭБУ;
- комплектование системы управления двигателем подсистемой PrimeServ Online Service, способной автоматически и непрерывно контролировать основные параметры работы системы



CRDI и двигателя, обеспечивает техническую поддержку эксплуатационников в режиме удаленного доступа.

### Заключение (Conclusion)

Несмотря на наличие достаточно большого количества недостатков системы CRDI, интеллектуальные аккумуляторные системы находят все более широкое применение в судовых дизельных энергетических установках, обеспечивая возможность достижения постоянно растущих требований к экономичности и экологической безопасности.

С уверенностью можно утверждать, что многообразие конструкций системы *Common Rail*, высокий уровень конструирования, применение прогрессивных материалов и технологий позволят производителям повысить уровень эксплуатационных свойств выпускаемого оборудования, а также создаст предпосылки к обеспечению желаемых ресурсных характеристик элементной базы системы.

### Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Конструкцию современного дизельного двигателя в настоящее время невозможно представить без систем электронного управления процессами. Наиболее важным является процесс топливоподачи, управление которым производится посредством электронно-управляемой аккумуляторной системы высокого давления CRDI.

2. Эксплуатационные особенности судовых дизельных двигателей предъявляют повышенные требования к разработчикам в плане обеспечения надежности систем энергетических установок, в частности системы топливоподачи при одновременном соответствии постоянно растущим требованиям экологических стандартов, достижение которых в настоящее время оказывается практически невозможным без использования в конструкции двигателей системы CRDI.

3. Обладая рядом преимуществ по сравнению с более ранними системами топливоподачи, система CRDI не лишена недостатков, основным из которых является относительно низкая надежность комплектующих системы при их высокой стоимости.

4. К наиболее уязвимым узлам топливной системы CRDI в механическом плане следует отнести быстродействующий управляющий впрыском клапан форсунки.

5. Среди возникающих в эксплуатации неисправностей электронных элементов в первую очередь отмечается выход из строя первичных датчиков и электромеханических исполнительных устройств.

6. Опыт эксплуатации создаёт предпосылки к дальнейшему совершенствованию системы CRDI в целом и комплектующих её элементов, а также к существенному повышению надежности и достижению стабильных эксплуатационных свойств.

*Авторы выражают благодарность инженеру, канд. техн. наук А. Ю. Мезерницкому и инженеру М. А. Волкову за предоставленные дополнительные данные по характерным неисправностям системы CRDI, а также за оказанные консультации в структурировании отказов системы, без помощи которых настоящая работа не была бы выполнена в настоящем объеме.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов М. Ю. Современные средне- и высокооборотные дизели с электронными системами управления / М. Ю. Иванов, В. А. Шишкин, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 40–45.
2. Мельник Г. В. Системы электронного управления ДВС и их компоненты / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2010. — № 4. — С. 39–52.
3. Живлюк Г. Е. Опыт эксплуатации ДЭУ с аккумуляторными системами топливоподачи сверхвысокого давления / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Сборник 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. 48–49.

4. Socol S. High-pressure components of common-rail system / S. Socol, W. Brühmann // *Diesel Engine Management*. — Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. — Pp. 128–151. DOI: 10.1007/978-3-658-03981-3\_13.

5. Leonhard R. Injection Technology for Marine Diesel Engines / R. Leonhard, M. Parche, C. Kendlbacher // *MTZ worldwide eMagazine*. — 2011. — Vol. 72. — Is. 4. — Pp. 10–17. DOI: 10.1365/s38313-011-0035-z.

6. Kampichler D.I.G. Industrial and Marine Engines / D.I.G. Kampichler, I.H. Bülte, I.F. Koch, K. Heim // *Handbook of Diesel Engines*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. — Pp. 559–608. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6\_18.

7. Живлюк Г. Е. Состояние и перспективы совершенствования систем топливоподачи Common Rail / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 1 (35). — С. 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.

8. Петров А. П. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.

9. Asada K. Improving Internal Fatigue Strength of the Rail for Diesel Engine Common Rail System / K. Asada, M. Usui, R. Kusanagi, E. Watanabe, K. Mizuno. — SAE Technical Paper, 2000. — № 2000-01-0707. DOI: 10.4271/2000-01-0707.

10. Thumser R. Investigation on defect distribution and its statistical evaluation for case hardened material states / R. Thumser, S. Kleemann, J. W. Bergmann, A. Kleemann // *International Journal of Fatigue*. — 2012. — Vol. 41. — Pp. 52–56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.024.

11. Kendlbacher C. Advanced injection systems for large marine and industrial engines / C. Kendlbacher, D. Blatterer, M. Bernhaupt // *MTZ industrial*. — 2015. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 42–49. DOI: 10.1007/s40353-015-0509-6.

12. MAN Diesel & Turbo — Common Rail. Design & Field Experience [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/348692064/man-common-rail-pdf> (дата обращения: 22.04.2017).

## REFERENCES

1. Ivanov, M.Yu, V.A. Shishkin, and A.P. Petrov. “Present-Day Mid- & High-Speed Diesel Engines Featuring Electronic Controls.” *Dvigatelaye stroyeniye* 4 (2006): 40–45.

2. Melnik, G.V. “Electronic Engine Control Systems and Components.” *Dvigatelaye stroyeniye* 4 (2010): 39–52.

3. Zhivlyuk, G.E., and A.P. Petrov. “Opyt ekspluatatsii DEU s akkumulyatornymi sistemami toplivopodachi sverkhvysokogo davleniya.” *Sbornik tezisev 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: 48–49.

4. Socol, Sandro, and Werner Brühmann. “High-pressure components of common-rail system.” *Diesel Engine Management*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. 128–151. DOI: 10.1007/978-3-658-03981-3\_13.

5. Leonhard, Rolf, Marcus Parche, and Christoph Kendlbacher. “Injection Technology for Marine Diesel Engines.” *MTZ worldwide eMagazine* 72.4 (2011): 10–17. DOI: 10.1365/s38313-011-0035-z.

6. Kampichler, Dipl.-Ing. Günter, I.H. Bülte, I.F. Koch, and K. Heim. “Industrial and Marine Engines.” *Handbook of Diesel Engines*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 559–608. DOI: 10.1007/978-3-540-89083-6\_18

7. Zhivlyuk, Gregory Evgenyevich, and Aleksandr Pavlovich Petrov. “Status and prospects of perfection of fuel supply system common rail.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.

8. Petrov, Aleksandr Pavlovich, and Gregory Evgenyevich Zhivlyuk. “Development of electronic control systems of internal combustion engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.

9. Asada, Kikuo, Masayoshi Usui, Ryuichi Kusanagi, Eiji Watanabe, and Kazuteru Mizuno. “Improving Internal Fatigue Strength of the Rail for Diesel Engine Common Rail System.” No. 2000-01-0707. SAE Technical Paper, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-0707.

10. Thumser, Rayk, S. Kleemann, J. W. Bergmann, and A. Kleemann. "Investigation on defect distribution and its statistical evaluation for case hardened material states." *International Journal of Fatigue* 41 (2012): 52–56. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.024.
11. Kendlbacher, Christoph, Dieter Blatterer, and Martin Bernhaupt. "Advanced injection systems for large marine and industrial engines." *MTZ industrial* 5.1 (2015): 42–49. DOI: 10.1007/s40353-015-0509-6.
12. MAN Diesel & Turbo — Common Rail. Design & Field Experience. Web. 22 April 2017. <<https://ru.scribd.com/document/348692064/man-common-rail-pdf>>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Живлюк Григорий Евгеньевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [spb-engine-prof@mail.ru](mailto:spb-engine-prof@mail.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)  
**Петров Александр Павлович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [app.polab@inbox.ru](mailto:app.polab@inbox.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zhivljuk, Grigorij E.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [spb-engine-prof@mail.ru](mailto:spb-engine-prof@mail.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)  
**Petrov, Aleksandr P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [app.polab@inbox.ru](mailto:app.polab@inbox.ru), [kaf\\_dvs@gumrf.ru](mailto:kaf_dvs@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.  
Received: January 15, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-221-228

## ANALYSIS OF THERMAL EFFICIENCY OF SHIP HEAT EXCHANGERS OF TYPE “LIQUID-LIQUID”

**A. R. Ablaev, R. R. Ablaev**

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

*Methods for evaluating the efficiency of heat exchangers are considered. The object of the analysis are ship heat exchangers of the “liquid-liquid” type. Two methods for evaluating the efficiency of heat exchangers are explored: the first method is to determine the efficiency with respect to the given initial, final temperatures of the heat carriers and flow characteristics, thermodynamic efficiency; The second way is to determine the efficiency using the parameter  $S$  (the number of heat transfer units) and the countercurrent index (taking into account the flow of coolant flow). It is substantiated that the thermodynamic efficiency being determined does not fully reflect the consumer properties of the heat exchanger (unit costs) and can not give an objective assessment of the efficiency of the heat exchanger. The technique of an estimation of thermal efficiency of ship heat exchanging devices, at a stage of designing is offered. In this technique, the countercurrent heat exchanger efficiency is taken as an analog for liquid-liquid heat exchangers, while comparing the heat exchangers, the kind of fluid participating in the heat exchange process must be taken into account. The complex, which includes the heat exchange surface and the overall heat transfer coefficient, makes it possible to conveniently compare the designed heat exchanger with the “hypothetical analog” and evaluate it taking into account the one-time costs of production, the mass, the volume occupied by the vessel and the energy costs for overcoming hydraulic resistances during operation. This method allows to increase the thermal efficiency taking into account the change in hydraulic resistance. The calculation analysis of efficiency of ship heat-exchange devices of “liquid-liquid” type is given on the example of coolants for fresh water and oil OKN I-170-1 and OKP 17-420-1. It is determined that the increase in efficiency can be achieved due to the reserve of hydraulic resistances, both in the pipe and in the intertube cavity.*

*Keywords: heat exchange apparatus, estimation, thermal efficiency, thermal and hydrodynamic calculation.*

### For citation:

Ablaev, Alim R., and Remzi R. Ablaev. “Analysis of thermal efficiency of ship heat exchangers of type “liquid-liquid”.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 221–228. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-221-228.

**УДК 629.12.03-714.001.24**

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ТИПА «ЖИДКОСТЬ – ЖИДКОСТЬ»

**А. Р. Аблаев, Р. Р. Аблаев**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
г. Севастополь, Российская Федерация

*Рассматриваются методики оценки эффективности теплообменных аппаратов. Объектом анализа являются судовые теплообменные аппараты типа «жидкость – жидкость». Исследуются два способа оценки эффективности теплообменников: первый способ — определение эффективности по заданным начальным и конечным температурам теплоносителей и расходным характеристикам, а также термодинамической эффективности; второй способ — определение эффективности с использованием параметра  $S$  (число единиц переноса тепла) и индекса противоточности, учитывающего схему движения теплоносителей. Обосновывается, что определяемая термодинамическая эффективность не отражает в полной мере потребительских свойств теплообменного аппарата (удельные затраты) и не может дать объективной оценки эффективности теплообменника. Предлагается методика оценки тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов на стадии проектирования. В этой методике эффективность противоточного теплообменника принята за аналог для теплообменников «жидкость – жидкость», при этом при сравнении теплообменников род жидкости, участвующей в процессе теплообмена, должен обязательно учитываться. Комплекс  $S$ , в который входят поверхность теплообмена и общий коэффициент тепло-*

передачи, позволяет удобно сравнивать проектируемый теплообменник с «гипотетическим аналогом» и оценивать его с учетом единовременных затрат при изготовлении, массы, занимаемого объема на судне и затрат энергии на преодоление гидравлических сопротивлений при эксплуатации. Указанная методика позволяет повышать тепловую эффективность с учетом изменения гидравлических сопротивлений. Приведен расчетный анализ эффективности судовых теплообменных аппаратов типа «жидкость – жидкость» на примере охладителей пресной воды и масла ОКН 1-170-1 и ОКП 17-420-1. Определено, что повышение эффективности можно производить за счет резерва гидравлических сопротивлений как в трубной, так и в межтрубной полости.

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат, оценка, тепловая эффективность, тепловой и гидродинамический расчет.

#### Для цитирования:

Аблаев А. Р. Анализ тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов типа «жидкость – жидкость» / А. Р. Аблаев, Р. Р. Аблаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 221–228. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-221-228.

### Введение (Introduction)

Разработка и изготовление судовых теплообменных аппаратов (СТА) высокого качества предполагают наличие соответствующих критериев, позволяющих произвести объективную оценку. Применяемые критерии оценки эффективности энергетических установок, в том числе и критерии оценки эффективности теплообменных аппаратов, несмотря на их разнообразие, используют главным образом подход, позволяющий рассматривать теплообменник с одной или двух позиций. В работах [1] – [2] рассматривается способ оценки тепловой эффективности только для противоточного и прямоточного теплообменного аппарата. Предложенные методики, согласно исследованиям [3] – [5], могут быть применены для замкнутых систем охлаждения, для других видов теплообменных аппаратов данные не представлены. Результаты, полученные в серии работ [6] – [8], не позволяют оценить тепловую эффективность СТА при многоходовых течениях рабочих жидкостей в трубной и межтрубной полостях. Поэтому информация, необходимая для выбора оптимальной конструкции теплообменного устройства, не является достаточно полной, а исследования, касающиеся данной проблематики, не исчерпывают потребностей энергетической практики.

Целью работы является анализ и разработка методики оценки эффективности теплообменной поверхности аппарата на стадии расчета.

### Методы и материалы

Тепловую эффективность теплообменника оценивают зависимостью

$$\varepsilon = \frac{W_r(t_{r1} - t_{r2})}{W_{\min}(t_{r1} - t_{x1})} = \frac{W_x(t_{x2} - t_{x1})}{W_{\min}(t_{r1} - t_{x1})}, \quad (1)$$

где  $W_r$  — водяной эквивалент горячей жидкости;  $W_x$  — водяной эквивалент холодной жидкости;  $t_{r1}$ ,  $t_{r2}$  — температура горячей жидкости на входе в теплообменник и на выходе из теплообменника соответственно;  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$  — температура холодной жидкости на входе в теплообменник и на выходе из теплообменника соответственно;  $W_{\min}$  — наименьшая из величин  $W_r$  и  $W_x$  (как правило, она является заданной, т. е. задача проектировщика состоит в том, чтобы обеспечить указанную эффективность с наименьшими «приведенными затратами»).

Кроме исходных данных, разработчику СТА могут задаваться следующие ограничения: давление по трубной и межтрубной полостям; гидравлические сопротивления по трубной и межтрубной полостям; пространственная схема входа и выхода теплоносителей; конструктивные характеристики патрубков входа и выхода; параметры надежности. Разработчик СТА должен учитывать и другие нормативные ограничения, к которым относятся: скорость морской воды в трубной полости в зависимости от применяемых материалов теплообменных труб (выбор ма-



териалов теплообменных труб связан с параметрами надежности и заданным гидравлическим сопротивлением); скорость охлаждаемой среды в межтрубной полости, которая ограничивается как гидравлическим сопротивлением межтрубной полости, так и частотой колебаний теплообменных труб, которая не должна совпадать с частотой колебаний судовых механизмов; род жидкости как по межтрубной, так и по трубной полостям (по межтрубной полости это различные марки масел, пресная вода, дистиллят; по трубной полости — морская вода различной солености либо пресная вода, если теплообменник находится во втором контуре системы охлаждения); температура внутренней и наружной стенок труб. Однако в основе проектирования теплообменника лежит определение его теплообменной поверхности в указанных ограничениях, которые существенно затрудняют выбор реального аналога для сравнения с проектируемым СТА. Поэтому для его оценки по тепловой эффективности рекомендуется гипотетический аналог, в сравнении с которым можно оценить его уровень с позиций как термодинамического показателя, так и с учетом энергетической эффективности.

В статье [9] используются критерии по группе назначения, которые объективно отражают потребительские свойства судовых охладителей; рассматривается процедура сравнения оцениваемого аппарата с аналогами, исключающая несопоставимость результатов; предлагается, чтобы в основе сравнения лежала тепловая эффективность аппарата, которую можно выразить в виде

$$\varepsilon = \frac{\delta t}{\Delta t} = f\left(\frac{kF}{W_{\min}}, \frac{W_{\min}}{W_{\max}}, \text{схема тока}\right), \quad (2)$$

где  $\delta t$  — изменение температуры теплоносителя с меньшим водяным эквивалентом, °C;  $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К);  $F$  — поверхность теплообмена, м²;  $\Delta t$  — располагаемый температурный напор в теплообменнике, °C.

Обозначим соотношение  $\frac{W_{\min}}{W_{\max}} = A$ .

Выразим

$$\frac{kF}{W_{\min}} = \frac{\delta t}{\Delta t} = S. \quad (3)$$

В указанной форме записи безразмерная величина  $S$  представляет собой число единиц переноса теплоты, которая в неявном виде характеризует массу СТА и затраты энергии, характеризующие долю коэффициента теплопередачи в произведении  $kF$ .

Указанные безразмерные параметры не только позволяют в удобной форме представить графически характеристики теплообменников, но и имеют вполне определенный физический смысл. Например, эффективность  $\varepsilon$  выражает соотношение между фактически переданным количеством теплоты  $W_r(t_{r1} - t_{r2}) = W_x(t_{x2} - t_{x1})$  и тем максимально возможным количеством теплоты, которое может быть передано только в идеальном противоточном теплообменнике с бесконечно большой поверхностью теплопередачи, а именно  $W_x(t_{r1} - t_{x1})$ , если  $W_x < W_r$ , или  $W_r(t_{r1} - t_{x1})$ , если  $W_r < W_x$ . Таким образом  $\varepsilon$  представляет собой эффективность теплообменника с термодинамической точки зрения. С другой стороны, величину  $\varepsilon$  определяют  $S$ ,  $A$  и схема тока. В [2] для противоточного теплообменника она выражается зависимостью

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-S(1-A)}}{1 - A \cdot e^{-S(1-A)}}, \quad (4)$$

которая может рассматриваться как эффективность совершенного теплообменника с точки зрения оптимальной схемы тока.

В этом уравнении величина  $S$  для реального теплообменника рассчитывается при теплогидродинамическом расчете, используя уравнения:

$$S = \frac{F \cdot k}{W_{\min}} = \frac{Q}{\Delta t_{\log} \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot W_{\min}}; \quad (5)$$

$$F \cdot k = \frac{Q}{(\Delta t_{\log} \cdot \varepsilon_{\Delta t})}, \quad (6)$$

где  $Q$  — общая тепловая нагрузка теплообменника;  $\Delta t_{\log}$  — среднелогарифмическое значение разности температур двух теплоносителей, рассчитанное для случая истинного противотока, °С;  $\varepsilon_{\Delta t}$  — коэффициент, являющийся функцией.

Указанный коэффициент выражен в виде функции следующим образом:

$$\varepsilon_{\Delta t} = f(P, R), \quad (7)$$

где  $P = \frac{t_{x2} - t_{x1}}{t_{r1} - t_{x1}}; R = \frac{t_{r1} - t_{r2}}{t_{x2} - t_{x1}}.$

Для противоточных теплообменников безразмерный коэффициент  $\varepsilon_{\Delta t} = 1$ . Для всех остальных схем движения  $\varepsilon_{\Delta t}$  меньше единицы. Этот коэффициент может быть определен для различных схем движения теплоносителей и представлен в форме графиков, которые приведены в [1] и отображают зависимость (7).

Коэффициент теплопередачи  $k$  характеризует интенсификацию теплообмена, который, в свою очередь, зависит от принятой конфигурации элементов теплообменной поверхности и гидродинамических условий движения рабочих сред.

Численные результаты по уравнению (4) представлены на графике (рис. 1). Из графика следует, что эффективность  $\varepsilon$  противоточного теплообменника  $\varepsilon < 0,2$  в пределах величины  $S$  от 0 до 0,25; характеризуется уравнением прямой  $\varepsilon = aS$ , где  $a$  — тангенс угла наклона, и не зависит от отношения  $A$ . При значениях  $S$  от 0,25 до 0,6 эффективность  $\varepsilon$  возрастает от 0,2 до 0,4; зависимость  $\varepsilon$  от  $A$ , начиная от величины  $S = 0,4$ , проявляется, но слабо. При возрастании  $S > 0,8$  эффективность растет, при этом существенно сказывается влияние  $A$ .

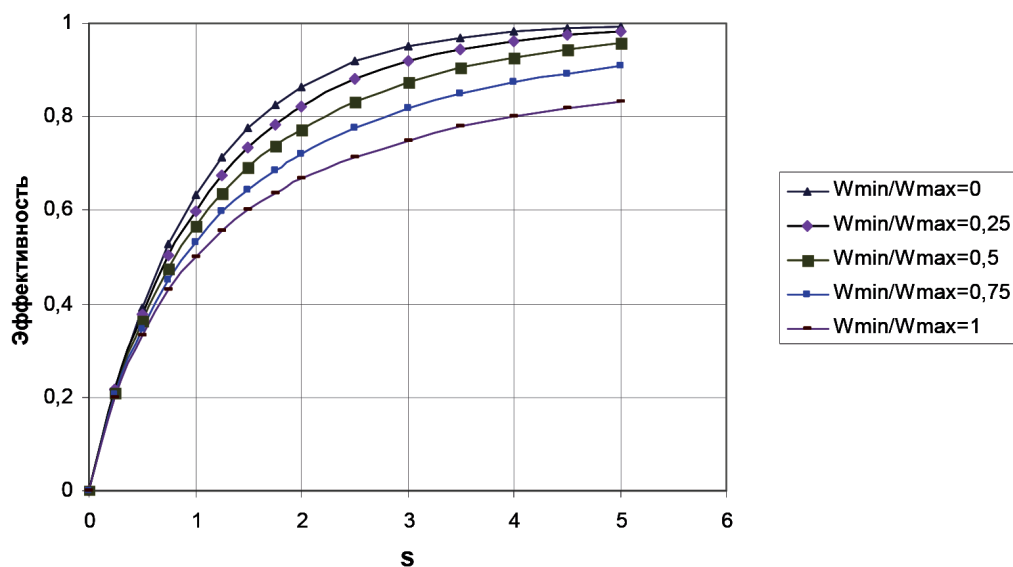


Рис. 1. Эффективность противоточного теплообменника,  $\varepsilon = f(S)$

Таким образом, эффективность противоточного теплообменника, которая определяется как  $\varepsilon = f(S, A)$ , можно принять за аналог для теплообменников «жидкость – жидкость», при этом при сравнении теплообменников должен обязательно учитываться род жидкости, участвующей в процессе теплообмена.

Комплекс  $S$ , в который входят поверхность теплообмена и общий коэффициент теплопередачи в уравнении (3), позволяет удобно сравнивать проектируемый теплообменник с «гипотети-

ческим аналогом» и оценивать его с учетом единовременных затрат при изготовлении, массы, занимаемого объема на судне и затрат энергии на преодоление гидравлических сопротивлений при эксплуатации.

При проектировании теплообменных аппаратов и использовании графиков для оценки  $\varepsilon_{\Delta t}$  при различных схемах движения теплоносителей допускаются погрешности, вычисления являются утомительными и громоздкими, так как расчетчику приходится выполнять много последовательных приближений. Поэтому в [10] предложено схему тока выражать через индекс противоточности, а эффективность любых теплообменников — уравнениями:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot [e^{S z_t} - 1]}{[z_t + (A + 1)] e^{S z_t} + z_t - (A + 1)}; \quad (8)$$

$$z_t = \sqrt{(A + 1)^2 - 4pA}, \quad (9)$$

где  $p$  — индекс противоточности, учитывающий эффективность переноса теплоты рассматриваемой схемы тока и величины  $A$ .

Эффективность, определяемая по уравнению (8), является, по существу, параметром проектируемого (либо сравниваемого) теплообменника.

Из уравнения (8) следует, что величина  $\varepsilon$  может быть увеличена при  $p \rightarrow 0$  за счет увеличения  $S$ . В этом случае  $S$  является функцией затрат и потребляемой мощности. Её можно выразить следующей функцией:  $S = f(\text{затрат, суммарной мощности})$ .

В результате оценки тепловой эффективности охладителей пресной воды численно показано, что при значениях  $S > 1$  управлять эффективностью охладителя возможно с помощью величины  $A$  (увеличение расхода охлаждающей воды). При значениях  $S < 0,5$  управлять повышением эффективности с помощью величины  $A$  не имеет смысла, так как зависимость  $\varepsilon = f(S, A)$  равнаценна при различных значениях  $A$ .

Таким образом, оценку тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов типа «жидкость – жидкость» можно производить по предлагаемой методике.

### Обсуждение (Discussion)

В качестве примера рассмотрим эффективность охладителей масла ОКН 1-170-1 и ОКП 17-420-1 [11].

При номинальном режиме их фактическая эффективность совпала с эталонным теплообменником с противоточной схемой тока. Однако, по данным расчета, в указанных охладителях был резерв по гидравлическим сопротивлениям. Этот резерв позволяет изменить внутреннее расположение перегородок и увеличить скорость потока в межтрубном пространстве, так как на величину  $S = \frac{F \cdot k}{W_{\min}}$  оказывает существенное влияние коэффициент теплоотдачи в межтрубной полости. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

#### Результаты оценки эффективности охладителей (охлаждаемая среда — масло)

| Модификация охладителя | $S$   | $A$     | $\varepsilon$ (расч.) | $\Delta P_m$ , Па |
|------------------------|-------|---------|-----------------------|-------------------|
| ОКП 17-420-1           | 2     | 0,2125  | 0,827                 | 87788,2           |
| ОКП 17-420-1           | 2,37  | 0,2125  | 0,8718                | 179511,8          |
| ОКН 1-170-1            | 3,12  | 0,03505 | 0,9511                | 74047             |
| ОКН 1-170-1            | 3,39  | 0,03505 | 0,96213               | 97384,71          |
| ОКН 1-170-1            | 3,618 | 0,03505 | 0,96926               | 126393,5          |

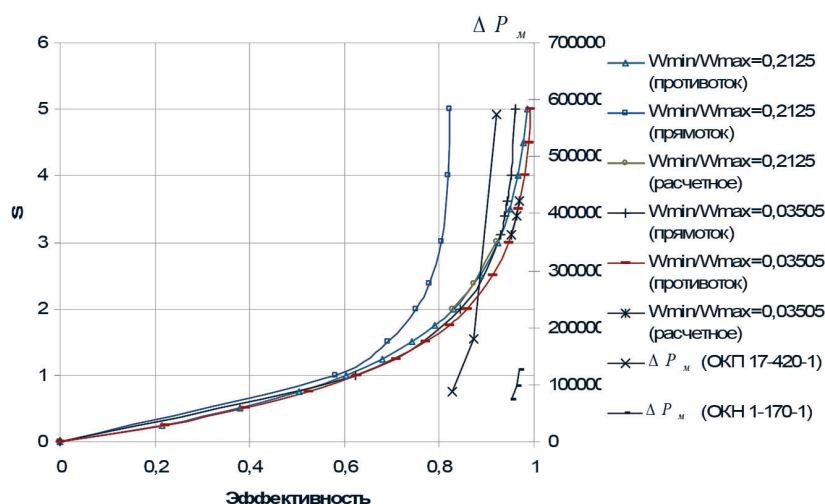


Рис. 2. Результаты оценки эффективности охладителей (охлаждаемая среда — масло)

Из рис. 2 видно, что эффективность охладителей масла можно повысить за счет использования резервов по гидравлическому сопротивлению в межтрубной полости (уменьшения расстояния между перегородками). В этом случае значение  $S$  для ОКП увеличилось в 1,18 раза, гидравлическое сопротивление по межтрубной полости — в 2 раза. При этом максимальное сопротивление не превысило заданное 0,2 МПа. Для ОКН значение  $S$  увеличилось в 1,16 раза, гидравлическое сопротивление по межтрубной полости в 1,7 раза. При этом максимальное сопротивление не превысило заданное 0,2 МПа. Аналогично выполнена оценка для охладителей пресной воды. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Результаты оценки эффективности охладителей (охлаждаемая среда пресная вода)

| Модификация охладителя | $S$     | $A$     | $\varepsilon$ (расч.) | $\Delta P_m$ , Па |
|------------------------|---------|---------|-----------------------|-------------------|
| ОКП 17-420-1           | 1,833   | 1,067   | 0,627                 | 8846,57           |
| ОКП 17-420-1           | 2,438   | 0,5325  | 0,8139                | 40381,9           |
| ОКП 17-420-1           | 2,97    | 0,5325  | 0,85784               | 98149,27          |
| ОКП 17-420-1           | 3,4     | 0,5325  | 0,8838                | 204629,7          |
| ОКН 1-170-1            | 0,3946  | 1,06987 | 0,2796                | 5586              |
| ОКН 1-170-1            | 0,62993 | 0,534   | 0,42136               | 22199,24          |
| ОКН 1-170-1            | 0,9654  | 0,534   | 0,547                 | 46203,37          |
| ОКН 1-170-1            | 1,202   | 0,534   | 0,61336               | 107135,3          |

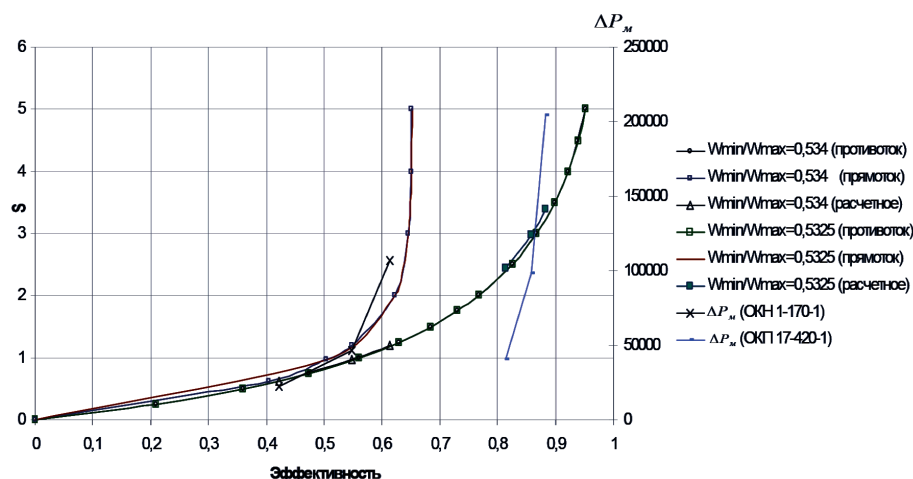


Рис. 3. Результаты оценки эффективности охладителей (охлаждаемая среда пресная вода)

На номинальном режиме коэффициент теплоотдачи в трубной полости для ОКП 17-420-1 при  $A = 1,067$  был ниже в 2,6 раза, чем в межтрубной. При  $A = 0,5325$  коэффициент теплоотдачи увеличился в 1,65 раза, величина  $S$  увеличилась в 1,33 раза, гидродинамическое сопротивление в трубной полости увеличилось в 4,5 раза. При этом общее сопротивление составило 0,04 МПа и не превысило заданного.

На номинальном режиме, коэффициент теплоотдачи в трубной полости для ОКН 1-170-1 при  $A = 1,06987$  был ниже в 2,5 раза, чем в межтрубной. При  $A = 0,534$  коэффициент теплоотдачи увеличился в 1,65 раза, величина  $S$  увеличилась в 1,6 раза, гидродинамическое сопротивление в трубной полости увеличилось в 4 раза. При этом общее сопротивление составило 0,023 МПа и не превысило заданного.

### Заключение (Conclusion)

Предложен усовершенствованный метод оценки энергетической эффективности проектируемых аппаратов, основанный на использовании числа переноса количества теплоты с учетом функциональных связей водяных эквивалентов, индекса противоточности и потерь давления.

Данная методика оценки тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов может быть использована на стадии эскизного проектирования СТА. В этой методике эффективность противоточного теплообменника принята за аналог для теплообменников «жидкость – жидкость», при этом при сравнении теплообменников должен обязательно учитываться род жидкости, участвующей в процессе теплообмена. Комплекс  $S$ , в который входят поверхность теплообмена и общий коэффициент теплопередачи, позволяет удобно сравнивать проектируемый теплообменник с «гипотетическим аналогом» и оценивать его с учетом единовременных затрат при изготовлении, массы, занимаемого объема на судне и затрат энергии на преодоление гидравлических сопротивлений при эксплуатации. Указанная методика позволяет повышать тепловую эффективность с учетом изменения гидравлических сопротивлений. Приведен расчетный анализ эффективности судовых теплообменных аппаратов типа «жидкость – жидкость» на примере охладителей пресной воды и масла ОКН 1-170-1 и ОКП 17-420-1. Определено, что повышение эффективности можно производить за счет резерва гидравлических сопротивлений как в трубной, так и в межтрубной полости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.
2. Кэйс В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. — М.: Энергия, 1967. — 224 с.
3. Федоровский К. Ю. Исследование теплопередачи в экологически безопасных системах охлаждения энергоустановок морских объектов / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. А. Тимофеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2016. — № 3 (317). — С. 82–88.
4. Сырцов Л. А. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена на основе теории подобия / Л. А. Сырцов, И. В. Наумчик, А. В. Хорошавин // Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2015. — № 649. — С. 198–204.
5. Медведев В. В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве и повышение надежности судовых теплообменных аппаратов / В. В. Медведев, М. В. Лакиза // Судостроение. — 2015. — № 5. — С. 40–42.
6. Луданов К. И. Обобщенные методы теплового расчета кожухотрубных теплообменников-рекуператоров / К. И. Луданов // Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — № 15 (137). — С. 17–28.
7. Чабаева Е. А. Критерии эффективности теплообменников / Ю. А. Чабаева, А. П. Булеков, В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. — 2012. — Т. 26. — № 5(134). — С. 112–115.
8. Młynarczyk A. Box coolers as an alternative to existing cooling systems / A. Młynarczyk // Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie. — 2013. — nr. 36 (108) z. 2. — Pp. 131–136.
9. Макаров В. В. Анализ тепловой эффективности судовых теплообменных аппаратов / В. В. Макаров, А. Р. Аблаев // Энергомашиностроение. — 2006. — № 1. — С. 48–50.



10. Каневец Г. Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г. Е. Каневец. — К.: Наук. думка, 1979. — 352 с.
11. ОСТ 5.4254-86. Охладители масла и воды кожухотрубные с прямыми трубками. Технические условия.

## REFERENCES

1. Isachenko, V.P., V.A. Osipova, and A.S. Sukomel. *Teploperedacha*. M.: Energiya, 1975.
2. Keis, V.M., and A.L. London. *Kompaktnye teploobmenniki*. M.: Energiya, 1967.
3. Fedorovsky, K.Yu., N.K. Fedorovskiy, and V.A. Timofeev. "Investigation of heat transfer in an environmentally friendly cooling system power plants offshore facilities." *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 3(317) (2016): 82–88.
4. Syrtsov, L.A., I. V. Naumchik, and A. V. Khoroshavin. "Eksperimental'noe issledovanie konvektivnogo teploobmena na osnove teorii podobiya." *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo* 649 (2015): 198–204.
5. Medvedev, V.V., and M.V. Lakiza. "Intensification of heat exchange and improvement of reliability of ship-board heat exchangers." *Shipbuilding* 5 (2015): 40–42.
6. Ludanov, K.I. "The generalized methods of thermal calculation of recuperative tube heat exchanger. Analytical review." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 15(137) (2013): 17–28.
7. Chabaeva, E.A., A.P. Bulekov, V.B. Sazhin, I.A. Popov, and A.A. Bednyakova. "Kriterii effektivnosti teploobmennikov." *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii* 26.5(134) (2012): 112–115.
8. Młynarczak, Andrzej. "Box coolers as an alternative to existing cooling systems." *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 36 (108) z. 2 (2013): 131–136.
9. Makarov, V.V., and A.R. Ablaev. "Analiz teplovoi effektivnosti sudovykh teploobmennyykh apparatov." *Energomashinostroenie* (2006): 48–50.
10. Kanevets, G.E. *Obobshchennyye metody rascheta teploobmennikov*. K.: Nauk. dumka, 1979.
11. Russian Federation. OST 5.4254-86. Ship tube and shell oil and water coolers with straight tubes. Specification.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аблаев Алим Рустемович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»  
299053, Российская Федерация, Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
e-mail: [ARAblaev@sevsu.ru](mailto:ARAblaev@sevsu.ru)  
**Аблаев Ремзи Рустемович** — старший  
преподаватель  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»  
299053, Российская Федерация, Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
e-mail: [ablaev.expert@mail.ru](mailto:ablaev.expert@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Ablaev, Alim R.** —  
PhD, associate professor  
Sevastopol State University  
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053,  
Russian Federation  
e-mail: [ARAblaev@sevsu.ru](mailto:ARAblaev@sevsu.ru)  
**Ablaev, Remzi R.** —  
Senior Lecturer  
Sevastopol State University  
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053,  
Russian Federation  
e-mail: [ablaev.expert@mail.ru](mailto:ablaev.expert@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2017 г.  
Received: December 18, 2017.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237

## METHODS OF CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN SHIPBOARD ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH TOTAL ELECTRIC POWER DISTRIBUTION ON DIRECT CURRENT

**A. V. Grigoryev<sup>1, 2</sup>, A. Yu. Vasilyev<sup>2</sup>, R. R. Zaynullin<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

*The methods of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on direct current and with valve generators are considered. Unlike systems with a single type of current, in the systems under consideration, the generation and consumption of electric power occurs on alternating current, and the distribution occurs on a direct current. The actual standards for the calculation of short-circuit currents can not be used in such systems for a number of reasons. In particular, they do not consider separate sources of energizing of the short-circuit point and the operating modes of valve generator sets with variable rotation speed. AC electric machines receiving power supply from the DC grid through inverters carry out energizing of the short-circuit point in the DC network, what is due to the presence of reverse diodes. The capacitors banks in DC link are an additional source of energizing of short-circuit point. With a small resistance of the sections of the circuit through which the discharge currents of capacitors flow, the values of the discharge currents can reach hundreds of kiloamperes. Short-circuit currents cause a strong electrodynamic effect on the bus bars and can lead to serious damage to the switchboards with the occurrence of a fire. Due to this, it is necessary to develop methods for calculating of short-circuit currents in such systems. Methods for determining the maximum value of the shock current in the short-circuit point of the electric power system with the distribution of electric power on direct current are proposed in the article. Increasing the accuracy of calculations of short-circuit currents will increase the reliability and safety of shipboard electric power systems with electric power distribution on direct current.*

*Keywords: short circuit, electric current, electric power systems, valve generators, semiconductor converters, electric propulsion plants, rectifiers, inverters, capacitors, accumulator batteries.*

### For citation:

Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Ruslan R. Zaynullin. “Methods of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with total electric power distribution on direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 229–237. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237.

**УДК 621.315:621.3.025**

## МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОЛНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

**А. В. Григорьев<sup>1, 2</sup>, А. Ю. Васильев<sup>2</sup>, Р. Р. Зайнуллин<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье рассмотрена методика расчетов токов короткого замыкания в судовых электро-энергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе и вентильными ге-*

нераторами. В отличие от систем с одним родом тока, в рассматриваемых системах генерирование и потребление электроэнергии происходит на переменном токе, а распределение — на постоянном. Действующие стандарты для расчетов токов короткого замыкания в данных системах не могут быть использованы по ряду причин. В частности, в них не рассматриваются отдельные источники подпитки точки короткого замыкания и режимы работы вентильных генераторных агрегатов с переменной частотой вращения. Электрические машины переменного тока, получающие питание от сети постоянного тока через инверторы, осуществляют подпитку точки короткого замыкания в сети постоянного тока, что связано с наличием обратных диодов. Конденсаторные батареи звена постоянного тока являются дополнительным источником подпитки места короткого замыкания. При малом сопротивлении участков цепи, по которым протекают токи разряда конденсаторов, значения токов разряда могут достигать сотен килоампер. Токи короткого замыкания оказывают сильное электродинамическое воздействие на токопроводы и могут привести к серьезным повреждениям распределительных щитов с возникновением пожара. В связи с этим необходимо разработать методику расчета токов короткого замыкания в данных системах. В статье предложен способ определения наибольшего значения ударного тока в точке короткого замыкания электроэнергетической системы с распределением электроэнергии на постоянном токе. Повышение точности расчетов токов короткого замыкания позволит повысить надежность и безопасность судовых электроэнергетических систем с распределением электроэнергии на постоянном токе.

**Ключевые слова:** короткое замыкание, электрический ток, электроэнергетические системы, вентильные генераторы, полупроводниковые преобразователи, гребные электрические установки, выпрямители, инверторы, конденсаторы, аккумуляторные батареи.

**Для цитирования:**

Григорьев А. В. Методика расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с полным распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 229–237. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-229-237.

## Введение (Introduction)

В настоящее время в мировом судостроении вводятся в эксплуатацию суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС), вентильными генераторами и распределением электроэнергии на постоянном токе. Данные системы получили название *Onboard DC Grid*. В России примером судов, где применяется принцип *Onboard DC Grid*, является ледокольный буксир «Юрибей» проекта «Т40105» постройки ООО «Краншип» (г. Темрюк, Краснодарский край), и портовый ледокол *Aker ARC124* ФГУП «Атомфлот» (Выборгский судостроительный завод).

ЕЭЭС данных судов включает в себя главные вентильные дизель-генераторы, работающие через тиристорные выпрямители на главном распределительном щите (ГРЩ) постоянного тока. Гребные электродвигатели (ГЭД) получают питание от автономных инверторов. В качестве генераторов в ЕЭЭС данного типа применяются трехфазные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. На судах зарубежной постройки небольшого водоизмещения находят применение синхронные генераторы на постоянных магнитах.

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) с целью выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической устойчивости сборных шин ГРЩ производится на стадии технического проектирования. При разработке технических проектов ЕЭЭС необходимо производить расчет токов КЗ с использованием нормативных документов. На сегодняшний день отсутствует методика расчета токов КЗ в ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

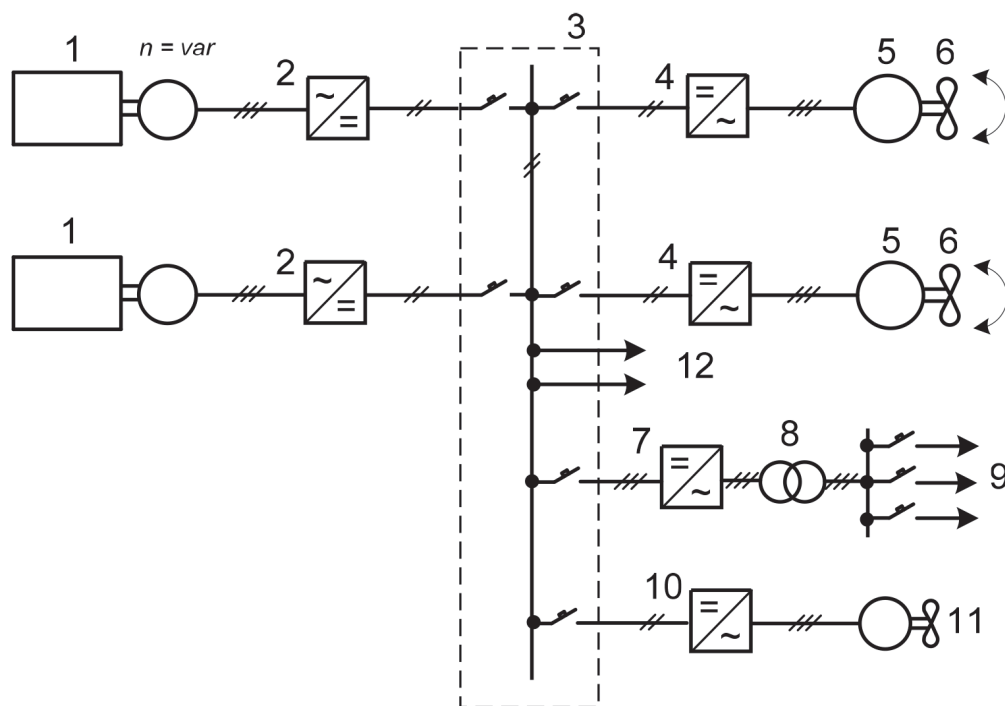
В настоящее время действуют следующие правила и стандарты, используемые при расчетах токов КЗ в судовых электрических сетях [1] – [3]:

- Правила классификации и постройки морских судов;
- ОСТ 5Р.6181-81. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы. Метод расчета переходных процессов»;

– ОСТ 6126-77. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания».

Данные стандарты предназначены для расчета токов КЗ в ЭЭС одного рода тока: переменного или постоянного. В случае рассмотрения систем с распределением на постоянном токе с одновременным генерированием и потреблением электроэнергии на переменном токе появляются технические сложности расчета токов КЗ, требующие отдельного рассмотрения.

Структурная схема ЕЭЭС с системой электродвижения (СЭД) и распределением электроэнергии на постоянном токе приведена на рисунке.



Структурная схема ЕЭЭС с полным распределением вырабатываемой электроэнергии на постоянном токе и СЭД с прямой передачей вращающего момента на винт:

- 1 — дизель-генераторы; 2 — полупроводниковые выпрямители; 3 — ГРЩ постоянного тока;  
4 — полупроводниковые инверторы гребной электрической установки;  
5 — гребной электродвигатель; 6 — гребной винт;  
7 — полупроводниковый инвертор общесудовых приемников; 8 — силовой понижающий трансформатор;  
9 — общесудовые приемники электроэнергии переменного тока;  
10 — полупроводниковый инвертор подруливающего устройства; 11 — подруливающее устройство;  
12 — общесудовые приемники электроэнергии постоянного тока

Трехфазные генераторные агрегаты (ГА) переменного тока вырабатывают электроэнергию, которая через выпрямители поступает на шины ГРЩ. Вентильные ГА могут работать с переменной частотой в зависимости от нагрузки, за счет чего достигается существенная экономия топлива [4], [5]. От ГРЩ электроэнергия постоянного тока посредством автономных инверторов напряжения преобразуется в переменный ток, питая гребной электропривод и общесудовые приемники электроэнергии. При наличии потребителей постоянного тока, их питание осуществляется непосредственно от ГРЩ постоянного тока.

Наибольшее значение тока КЗ в данной системе будет наблюдаться при возникновении замыкания на сборных шинах ГРЩ постоянного тока [6]. В этом случае в подпитке точки КЗ будут участвовать следующие источники электроэнергии:

- генераторные агрегаты;
- гребные электродвигатели, получающие питание от щита постоянного тока через инверторы;

- электродвигатели переменного тока, получающие питание от щита постоянного тока через инверторы;
- электродвигатели переменного тока, получающие питание от щита переменного тока;
- электродвигатели постоянного тока, получающие питание от щита постоянного тока;
- конденсаторы, установленные в сети постоянного тока;
- аккумуляторные батареи.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Источники подпитки точки КЗ отличаются по принципу действия, конструкции, техническим характеристикам, имеют разное активное, индуктивное сопротивление и постоянные времени [7] – [9]. Время нарастания ударного тока КЗ от электрических машин, конденсаторов и аккумуляторных батарей различно. Конденсаторные батареи при отсутствии индуктивности в цепи разряда выдают максимальный ток разряда (принимаемый за ударный ток от разряда конденсаторных батарей) в момент времени, близкий к нулю ( $t = 0$ ). При наличии индуктивности момент наступления максимального ударного тока смещается вправо по шкале времени. Ток разряда аккумуляторных батарей зависит только от внутреннего сопротивления и сопротивления цепи разряда. Наибольшее значение достигается также в момент времени, близкий к нулю ( $t = 0$ ). Электрические машины, представленные генераторами и электродвигателями, генерируют ударный ток в момент времени  $t$ , отличный от нуля. Значение времени  $t$  в данном случае напрямую зависит от частоты генератора  $f$ , где  $t = 1/2f$ , т. е. для частоты 50 Гц значение времени  $t = 0,01$  с.

В рассматриваемой схеме распределения электроэнергии на постоянном токе частота работы генератора может отличаться от 50 Гц. ГЭД и электродвигатели подруливающих устройств в момент наступления КЗ могут работать с произвольной частотой, определяемой законом управления частотного привода. Эквивалентные асинхронные электродвигатели работают на номинальной частоте (50 или 60 Гц). При определении наибольшего значения ударного тока в точке КЗ необходимо найти наибольшую сумму токов от источников подпитки точки КЗ в определенный момент времени.

Наиболее значимую по величине составляющую тока КЗ генерируют вентильные главные дизель-генераторы (ГДГ). В ЭЭС с полным распределением электроэнергии на постоянном токе каждый вентильный генератор подключен к своему выпрямителю. При КЗ трехфазного мостового выпрямителя, питающегося непосредственно от синхронного генератора, расчет тока КЗ на выводах выпрямителя выполняется как для случая симметричного КЗ на выводах генератора с учетом активных и реактивных сопротивлений кабельной линии генератор – выпрямитель.

В данном случае ударный ток КЗ будет определяться в соответствии с ОСТ 5Р.6181-81 по формуле [10] – [12]:

$$i_{уд} = \sqrt{2}(I_t - I_0'' \cdot \gamma_a) \cdot I_6, \quad (1)$$

где  $\gamma_a$  — коэффициент апериодической составляющей;  $I_6$  — базисный ток;  $I_t$  — периодическая составляющая тока КЗ;  $I_0''$  — начальное значение сверхпереходного тока.

Необходимо принимать во внимание, что вентильный генератор может работать на различных частотах, а значит, и ток КЗ будет иметь различные значения. Следовательно, вычисления токов КЗ необходимо проводить при минимальных и максимальных рабочих частотах ГДГ. В настоящее время наблюдается использование в ГДГ синхронных генераторов на постоянных магнитах. В действующих стандартах методы расчета токов КЗ для данного типа генераторов не приводятся.

Другим источником подпитки места КЗ являются ГЭД. В действующих правилах РС отмечается, что *электродвигатели, получающие питание от полупроводниковых преобразователей, не создают тока подпитки* [1]. Это утверждение справедливо для преобразователей, имеющих



в своем составе неуправляемые выпрямители. Автономные инверторы в связи с наличием обратных диодов могут при возникновении КЗ проводить электрический ток в обратном направлении. В связи с этим ГЭД также становятся источником подпитки точки КЗ. Становится возможным протекание тока подпитки точки КЗ от электрических двигателей через преобразователи.

В качестве ГЭД используют синхронные и асинхронные машины [13], [14]. В случае синхронного ГЭД расчет тока КЗ следует производить аналогично расчету токов КЗ от синхронных генераторов по формуле (1). В случае асинхронного ГЭД ударный ток КЗ будет определяться в соответствии с ОСТ 5Р.6181-81 по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \left( I_{ид} + \frac{U_c}{Z'_{р.д}} \cdot \gamma_a \right) \cdot I_{д.ном}, \quad (2)$$

где  $\gamma_a$  — коэффициент апериодической составляющей;  $I_{ид}$  — периодическая составляющую тока КЗ (действующее значение) для момента времени  $t$ ;  $U_c$  — напряжение на фидере двигателя до КЗ;  $I_{д.ном}$  — номинальный ток двигателя;  $Z'_{р.д}$  — полное расчетное сопротивление двигателя.

Третьим важным источником подпитки точки КЗ являются конденсаторы звена постоянного тока, расположенные как на входе полупроводниковых инверторов напряжения, питающих ГЭД, так и на выходе выпрямителей. Конденсаторы могут быть представлены отдельной конденсаторной батареей, подключенной непосредственно к шинам ГРЩ постоянного тока. Ёмкости конденсаторов, устанавливаемых на входах инверторов и входящих в состав автономных инверторов, значительны и достигают величины 10 мФ на 1 МВт мощности инвертора. При малом сопротивлении участков цепи, по которым протекают токи разряда конденсаторов, значения токов разряда могут достигать сотен килоампер. Ток разряда конденсатора пропорционален напряжению на конденсаторе, а его изменение во времени подобно изменению напряжения.

В начальный момент разряда напряжение на конденсаторе наибольшее, разрядный ток максимальный и разряд происходит быстро. При понижении напряжения ток разряда снижается, и процесс перехода зарядов с одной обкладки на другую замедляется. Время процесса разряда конденсатора зависит от сопротивления цепи и емкости конденсатора, причем возрастание как сопротивления, так и емкости увеличивает продолжительность разряда. С увеличением сопротивления разрядный ток снижается, замедляется процесс переноски зарядов с одной обкладки на другую. С увеличением емкости конденсатора заряд на обкладках повышается.

Мгновенное значение напряжения конденсатора в произвольный момент времени разряда конденсатора определяется формулой

$$U_t = U_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

мгновенная величина разрядного тока

$$i_t = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4)$$

где  $U_t$  — напряжение между обкладками конденсатора через  $t$  с после начала разряда, В;  $i_t$  — ток в цепи разряда конденсатора через  $t$  с после начала разряда, А;  $U_0$  — напряжение источника, от которого производится заряд конденсатора, В;  $R$  — сопротивление цепи разряда, Ом;  $T$  — постоянная времени в секундах ( $T = RC$ );  $e = 2,718$ .

Расчеты токов подпитки точки КЗ от электродвигателей переменного тока, получающие питание от щита переменного тока и электродвигателей постоянного тока, получающих питание от щита постоянного тока и аккумуляторных батарей, изложены в ОСТ 5Р.6181-81 и ОСТ 6126-77. После расчета тока подпитки точек КЗ от источников необходимо определить результирующий ток КЗ в каждой из выбранных точек.

При определении наибольшего значения ударного тока в точке КЗ необходимо найти наибольшую сумму токов от источников подпитки точки в произвольный момент времени. Для опре-

деления максимального значения ударного тока КЗ источники подпитки необходимо разбить на две группы:

- источники, которые выдают максимальный ударный ток в момент времени, близкий к  $t = 0$  с;
- источники, которые выдают максимальный ударный ток в момент времени, отличный от  $t = 0$  с.

К первой группе источников можно отнести конденсаторные и аккумуляторные батареи, ко второй — все генераторы и электрические двигатели.

Ударный ток от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени, близкий к нулю ( $t_0 = 0$  с), составит сумму токов от всех батарей в точке КЗ:

$$I_{\text{уд. б}t_0} = I_{c_1} + I_{c_2} + \dots + I_{c_n} + I_{\text{ак}} \quad (5)$$

Повторно проводится суммарный расчет ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени  $t_1 = 1/2f$

$$I_{\text{уд. б}t_1} = I_{c_1t_1} + I_{c_2t_1} + \dots + I_{c_nt_1} + I_{\text{ак}t_1}, \quad (6)$$

где  $t_1 = 1/2f$ ,  $f$  — частота напряжения генератора, Гц.

Производится суммарный расчет ударного тока от генераторов и электрических двигателей в момент времени  $t = 1/2f$ , который составит сумму токов от всех электрических машин в точке КЗ:

$$I_{\text{удэм}t_1} = I_{г_1} + I_{г_2} + \dots + I_{г_n} + I_{д_1} + I_{д_2} + \dots + I_{д_n}, \quad (7)$$

где  $t_1 = 1/2f$  ( $f$  — частота напряжения, Гц).

Производится сложение суммарного ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей, рассчитанного по формуле (7), и от генераторов и электрических двигателей в момент времени  $t = 1/2f$ , рассчитанного по формуле (8):

$$I_{\text{уд}t_1} = I_{\text{уд. б}t_1} + I_{\text{удэм}t_1}. \quad (8)$$

Из полученных значений ударного тока КЗ от конденсаторных и аккумуляторных батарей в момент времени, близкий к нулю,  $I_{\text{уд. б}t_0}$ , рассчитанных по формуле (5), и суммарного ударного тока от конденсаторных и аккумуляторных батарей и от генераторов и электрических двигателей в момент времени  $t = 1/2f$ ,  $I_{\text{уд}t_1}$ , рассчитанного по формуле (8), выбирается наибольшее значение. По наибольшему значению расчетного тока КЗ производится проверка защитно-коммутационного оборудования и шинопроводов на электродинамическую стойкость.

### Выводы (Conclusions)

1. В настоящее время в судостроении начинают применяться ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе с вентильными генераторами и системой электродвижения. При проектировании данных систем необходимо произвести расчет ударных токов КЗ для выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической стойкости оборудования.

2. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе имеет ряд особенностей, что связано с переменной частотой вращения вентильных ГДГ, наличием обратимых полупроводниковых преобразователей и накопителей электроэнергии, установленных в звене постоянного тока. Современная нормативная техническая документация не может быть использована для расчета токов КЗ в ЕЭЭС с вентильными генераторами и СЭД.

3. Разработанная методика расчета ударных токов КЗ учитывает режимы эксплуатации вентильных ГДГ, возможность подпитки места КЗ через полупроводниковые инверторы от ГЭД и общесудовых электродвигателей, а также наличие статических накопителей электроэнергии. Методика может быть рекомендована для расчетов токов КЗ в ЕЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе на стадии эскизного и технического проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. XI. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 129 с.
2. ОСТ 5Р.6181-81. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета переходных процессов. — 1981. — 596 с.
3. ОСТ 6126-77. Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания. — 1977. — 142 с.
4. Григорьев А. В. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2016. — № 1 (35). — С. 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169.
5. Шелудько В. Н. Научно-экспериментальный комплекс физических моделей судовых электроэнергетических систем и систем электродвижения нового поколения / В. Н. Шелудько, Ю. В. Сентябрьев, А. В. Григорьев [др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2016. — Т. 7. — С. 48–51.
6. Григорьев А. В. Особенности расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, С. М. Малышев // Российский морской регистр судоходства: науч.-техн. сб. — 2017. — Вып. 48/49. — С. 104–108.
7. Гольдштейн М. Е. Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2015. — Т. 15. — № 3. — С. 20–24. DOI: 10.14529/power150303.
8. Приходько В. М. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько, В. Ю. Лучкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.
9. Жуков В. В. Влияние обратимых двигатель-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ в системе постоянного тока электростанций / В. В. Жуков, В. Ф. Казайкин, М. А. Шиша [и др.] // Электрические станции. — 1990. — № 10. — С. 44–48.
10. Кузнецов Ю. П. Математическое моделирование и расчеты дуговых процессов при коротких замыканиях в сетях постоянного тока / Ю. П. Кузнецов, Эль-Зейн Адам // Тезисы докладов Всесоюзной науч. конф. «Токи короткого замыкания в энергосистемах». — М., 1995. — С. 64–67.
11. Азовцев А. А. Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока / А. А. Азовцев, Ю. В. Рокотян // Судовая электромеханика и связь. — 1968. — № 40. — С. 3–15.
12. Григорьев А. В. Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.
13. Grigoryev A. V. Unified ship power grids with alternators and DC power distribution / A. V. Grigoryev, S. M. Malyshev, R. R. Zaynullin // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. — IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.
14. Vicenzutti A. Studies on asymmetrical short circuit currents in shipboard medium voltage direct current distribution systems fed by AC generators / A. Vicenzutti, F. Tosato, E. De Din, G. Sulligoi // Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015 IEEE. — IEEE, 2015. — Pp. 48–53. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157860.

## REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Ch. XI. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.
2. OST 5R.6181-81. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy. Metod rascheta perekhodnykh protsessov. 1981.

3. OST 6126-77. Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy postoyannogo toka. Metod rascheta tokov korotkogo zamykaniya. 1977.
4. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. "Opportunities of introduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 165–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165–169.
5. Sheludko, Viktor Nikolaevich, Yuriy Vladimirovich Sentyabryov, Andrey Vladimirovich Grigoryev, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihailovich Malyshev. "Scientific-experimental complex of physical models of new generation ship electric power systems and electric propulsion plants." *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 7 (2016): 48–51.
6. Grigor'ev, A. V., A. Yu. Vasil'ev, and S. M. Malyshev. "Osobennosti raschetov tokov korotkogo zamykaniya v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh s raspredeleniem elektroenergii na postoyannom toke." *Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva: nauch.-tekhn. sb.* 48/49 (2017): 104–108.
7. Goldstein, M. E., and N. V. Korbukov. "VSC-HVDC transmission functions under short-circuit conditions in ac power system." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 15.3 (2015): 20–24. DOI: 10.14529/power150303.
8. Prikhodko, Valentin Makarovich, Irina Valentinovna Prikhodko, and Vasily Yuryevich Lucchino. "Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 185–195. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-185-195.
9. Zhukov, V. V., V. F. Kazaikin, M. A. Shisha, et al. "Vliyanie obratimyykh dvigatel'-generatorov i staticheskikh preobrazovatelei na tok KZ v sisteme postoyannogo toka elektrostantsii." *Elektricheskie stantsii* 10 (1990): 44–48.
10. Kuznetsov, Yu. P., and El'-Zein Adam. "Matematicheskoe modelirovanie i raschety dugovykh protsessov pri korotkikh zamykaniyakh v setyakh postoyannogo toka." *Tezisy dokladov Vsesoyuznoi nauchnoi konferentsii «Toki korotkogo zamykaniya v energosistemakh»*. M., 1995: 64–67.
11. Azovtsev, A. A., and Yu. V. Rokotyan. "Korotkie zamykaniya v moshchnykh elektroustanovkakh postoyannogo toka." *Sudovaya elektromekhanika i svyaz'* 40 (1968): 3–15.
12. Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. "Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.
13. Grigoryev, A. V., S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. "Unified ship power grids with alternators and DC power distribution." *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076232.
14. Vicenzutti, A., F. Tosato, E. De Din, and G. Sulligoi. "Studies on asymmetrical short circuit currents in shipboard medium voltage direct current distribution systems fed by AC generators." *Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015 IEEE*. IEEE, 2015: 48–53. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157860.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Григорьев Андрей Владимирович** —  
кандидат технических наук, доцент,  
генеральный директор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
АО «НПП «Электродвижение судов»  
197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,  
kaf\_saees@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Grigoryev, Andrey V.** —  
PhD, associate professor, CEO  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
JSC "RPC "Ship electric propulsion"  
12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,  
St. Petersburg, 197341,  
Russian Federation  
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,  
kaf\_saees@gumrf.ru

**Васильев Алексей Юрьевич —**

начальник отдела

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: [alex\\_was@mail.ru](mailto:alex_was@mail.ru)

**Зайнуллин Руслан Ринатович —**

руководитель проектов

АО «НПЦ «Электродвижение судов»

197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178

e-mail: [zaynullin@eds-marine.ru](mailto:zaynullin@eds-marine.ru)

**Vasilyev, Aleksey Yu. —**

Head of Department

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,

St. Petersburg, 197341, Russian Federation

e-mail: [alex\\_was@mail.ru](mailto:alex_was@mail.ru)

**Zaynullin, Ruslan R. —**

Chief project manager

JSC “RPC “Ship electric propulsion”

12 Fermskoe shosse Str., let. E, office 178,

St. Petersburg, 197341, Russian Federation

e-mail: [zaynullin@eds-marine.ru](mailto:zaynullin@eds-marine.ru)

*Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.*

*Received: January 15, 2018.*



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251

## THE PRINCIPLES OF FORMING A COMPUTER MODEL OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE POWER PLANTS

**A. V. Soloviev**

The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office,  
Nizhniy Novgorod, Russian Federation

*In the present work using a systematic analysis of the proposed structural diagram of ship power plants (SPP) with the ranking of the objects in the levels to create a computer model of diagnosing the technical condition of SPP. The proposed numerical assessment of the SPP obtained by the system synthesis. Method is implemented by "convolution" at each hierarchical level the numerical values of estimates of technical condition of structural parts of the subsystem of lower level. To solve this problem we used a multiplicative strategy convolution of partial indicators. This method allowed the objective function to represent as a product of partial indices. The weight of each criterion is ranked with weighting factors, are presented as indicators of the degree of individual criteria. According to the results of a survey of experts determined the ranked indicators of the technical state of all selected (recorded) objects of SPP. This paper has presented a mathematical model for estimating the technical condition of the SPP implemented in the form of a computer program. Developed a computer model of diagnosis allows us to obtain a numerical estimate of the technical condition of objects of SPP and SPP in general, to install suitable or unsuitable technical condition of the appropriate object of SPP, and to analyze the dynamics of state changes of those objects over time to identify the prerequisites and conditions, the consequence of which potential failure. It is shown that knowledge of the patterns of change in the technical condition is of great practical importance because it allows to determine not only the optimal timing of maintenance and repair, but use them in organizations for the classification of ships.*

*Keywords: computer model, technical diagnostics, indicators of technical condition, ship power plants, systematic analysis.*

### For citation:

Soloviev, Alexey V. "The principles of forming a computer model of diagnosing the technical condition of marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.1 (2018): 238–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251.

**УДК 621.431.74:004.94**

## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**А. В. Соловьев**

ФАУ «Российский Речной Регистр» Верхне-Волжский филиал  
Российского Речного Регистра, Нижний Новгород, Российская Федерация

*В настоящей работе с использованием системного анализа предложена структурная схема судовой энергетической установки (СЭУ) с ранжированием ее элементов по уровням, позволяющая составить компьютерную модель диагностирования технического состояния СЭУ. Предлагаемая в статье численная оценка состояния СЭУ получена методом системного синтеза. Данный метод реализован путем «свертки» на каждом иерархическом уровне численных значений оценок технического состояния структурных частей подсистемы более низкого уровня. Для решения данной задачи применена мультипликативная стратегия свертки частных показателей. Рассматриваемый метод позволил представить целевую функ-*

цию в виде произведения частных показателей. Вес каждого критерия ранжирован с помощью весовых коэффициентов, представленных в виде показателей степени частных критериев. По результатам опроса экспертов определялись ранжированные показатели технического состояния всех выделенных (учитываемых) элементов СЭУ. В работе получена математическая модель оценки показателя технического состояния СЭУ, реализованная в виде компьютерной программы. Разработанная компьютерная модель диагностирования позволяет получить численную оценку технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом, установить годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ, а также проанализировать динамику изменения состояния этих элементов во времени для выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Показано, что знание закономерностей изменения технического состояния имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определять не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и использовать их в деятельности организаций по классификации судов.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, техническая диагностика, показатели технического состояния, судовая энергетическая установка, системный анализ.

Для цитирования:

Соловьев А. В. Принципы формирования компьютерной модели диагностирования технического состояния судовой энергетической установки / А. В. Соловьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 238–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251.

### Введение (Introduction)

В настоящее время изготовитель снабжает каждый ответственный элемент СЭУ автоматической системой параметрического диагностирования. Основной целью разработки и внедрения таких систем является повышение эксплуатационной надежности контролируемого оборудования, в связи с чем одним из важных компонентов теоретической базы разработчиков диагностического обеспечения являются сведения из теории надежности, теории вероятностей, математической статистики и, разумеется, теории рабочих процессов конкретного оборудования. Вместе с тем основной задачей, которую необходимо решать для достижения поставленной цели, является распознавание состояния технической системы, на это указывает и гносеология самого термина «диагностика» (от греч. — *diagnosis* — распознавание, определение). Непосредственно процесс оценки состояния технического объекта предполагает измерение параметров как в процессе эксплуатации, так и при выполнении экспериментальных исследований объектов и диагностических приборов, проведение которых не может быть организовано без учета теории измерений, метрологии, планирования экспериментов и обработки числовых данных.

### Методы и материалы (Methods and materials)

Одной из важных предпосылок обеспечения технической безопасности плавания является техническая диагностика судовых дизелей (главных и вспомогательных) и других элементов СЭУ в процессе их эксплуатации. Анализ литературных источников [1] – [3] позволяет сделать вывод о том, что установка специализированных диагностических комплексов осуществлялась только для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) достаточно высокой мощности, применяемых на морских судах, в то время как на речных и смешанных судах (*река – море*) такие системы не были использованы. Техническая диагностика на судах с классом Речного Регистра сводится к снятию индикаторных диаграмм, теплотехническому контролю и затем ручной обработке полученных результатов судовыми механиками или теплотехническими партиями. Однако современное положение дел на внутреннем водном транспорте требует пересмотра подходов в области безразборной технической диагностики, а именно в ее автоматизации.

Решение задачи технической диагностики судовых двигателей, а следовательно, и других, менее сложных элементов СЭУ речных судов становится возможным, поскольку современные электронные системы управления [4] – [6] позволяют осуществлять непрерывный мониторинг технических параметров, т. е. сбор и обработку информации, полученной от датчиков регулируемых величин и процессов. В этой связи задача установки специализированных диагностических

комплексов становится неактуальной, так как информация, полученная от электронных систем управления двигателем и другими элементами СЭУ, может обрабатываться центральным компьютером управления или компьютером машинного отделения в целях управления и диагностирования всей СЭУ [7] – [8], а не только ее отдельных элементов. При этом основной задачей технической диагностики становится разработка компьютерной модели диагностирования технического состояния СЭУ.

Любой элемент СЭУ можно рассматривать как техническую систему, представляющую упорядоченную совокупность некоторого количества совместно действующих элементов (агрегатов, узлов, деталей) и предназначенную для выполнения заданных функций [9], [10]. Каждая техническая система характеризуется вполне определенными структурой и способом функционирования. Под структурой системы подразумевают характер взаимосвязи и взаимодействия элементов системы, который определяется их геометрическими размерами, механическими, тепловыми, электрическими и другими параметрами. Числовые значения этих величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$  достаточно полно характеризуют техническое состояние, работоспособность и качество функционирования любого технического средства, механизма в данный момент времени.

В процессе эксплуатации параметры технического состояния изменяются от паспортных значений  $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nn}$  до предельных  $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nn}$ , которые, как правило, обоснованы технико-экономической целесообразностью дальнейшей эксплуатации объекта. Разность между текущими и паспортными значениями параметров  $\Delta X_{ii} = X_{ni} - X_{ii}$  характеризует степень отклонения значений параметров технического состояния объекта от норматива. Техническое состояние и работоспособность сложных объектов, каким, например, является ДВС, характеризуется набором параметров. Далее под техническим состоянием любого элемента СЭУ будем понимать уровень его работоспособности, исправности и соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Техническое состояние  $TC_i(t)$   $i$ -го элемента СЭУ в момент некоторой наработки  $t$  является функцией следующих параметров:

- начального технического состояния  $X_{ni}$ , обусловленного особенностями конструкции, качеством материалов и изготовления объекта;
- условий эксплуатации, характеризуемых параметрами  $Z_i$ ;
- закономерности изменения технического состояния  $F_i$ , которая формируется в зависимости от характера протекания процессов изнашивания и разрушения основных деталей, узлов и зависит от сложности конструкции, условий эксплуатации и качества сборки.

Тогда техническое состояние элемента СЭУ можно описать функционалом  $TC_i(t) = f(X_{ni}, Z_i, F_i, t)$ .

Характер изменения параметров технического состояния элементов СЭУ должен быть учтен при организации их эксплуатации. Знание закономерностей изменения этих параметров имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определять не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и возможность их использования в классификационной деятельности организации для определения годного или негодного технического состояния элементов СЭУ.

В соответствии с требованиями системного анализа с целью наиболее достоверного описания системы (в данном случае — СЭУ с точки зрения её технического состояния) система условно «расчленяется» на подсистемы (составные части) различных иерархических уровней, причем чем ниже иерархический уровень подсистемы, тем проще входящие в него структурные части, и наоборот. Принятое в работе разбиение на подсистемы представлено на схеме рис. 1, которая не включает отдельные элементы СЭУ (например, теплообменные аппараты и сосуды под давлением, холодильные установки, бытовые нагревательные установки, системы автоматизации и др.). Судовые системы (СС) и электроэнергетическая установка (ЭЭУ) формально не являются элементами СЭУ, однако автор посчитал необходимым включить в структурную схему основные элементы СС и ЭЭУ, техническое состояние которых, как показывает опыт, представляется важным для анализа техниче-

ского состояния СЭУ. Этим, в частности, объясняется отсутствие в числе анализируемых объектов электрических машин и приводов, аккумуляторов и других важных элементов ЭЭУ.

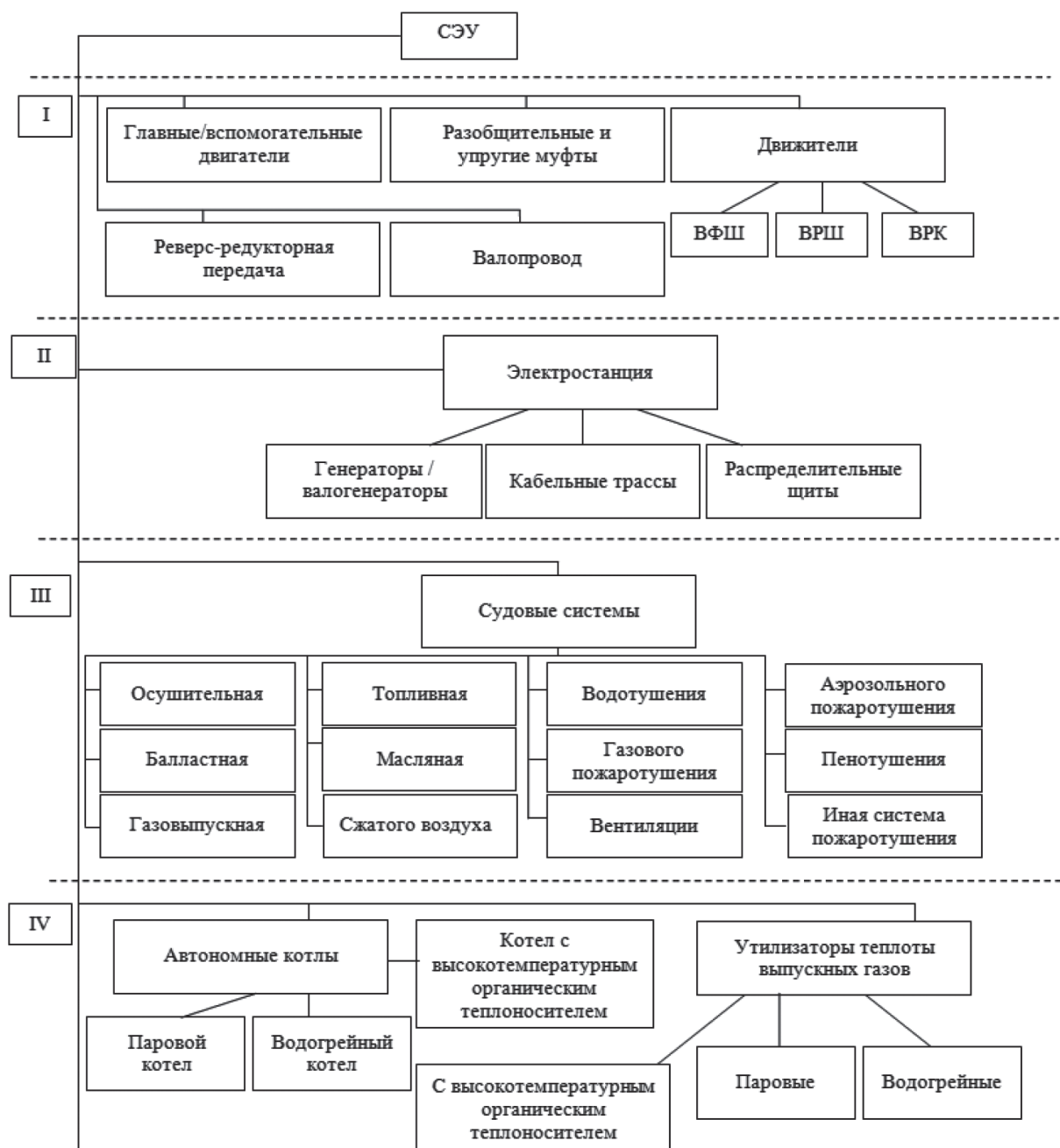


Рис. 1. Структурная схема СЭУ с ранжированием ее элементов по уровням I – IV

Техническое состояние СЭУ (численная оценка рассматриваемого свойства СЭУ) устанавливается методом системного синтеза, который в данном случае может быть реализован путем «свертки» на каждом иерархическом уровне численных значений оценок технического состояния, называемых в дальнейшем *уровнями оценок, структурных частей подсистемы более низкого иерархического уровня*.

Компьютерная модель диагностирования элементов СЭУ должна включать в себя построения, конечной целью которых является формирование следующих показателей (критериев) технического состояния:

$$TC_{ДВС}, TC_{РРП}, TC_M, TC_{ПВ}, TC_{ДВЖ}, TC_{ЭЭУ}, TC_{СС}, TC_{АК}, TC_{УК},$$

где  $ТС_{ДВС}$  — показатель технического состояния ДВС;  $ТС_{РРП}$  — показатель технического состояния реверс-редукторной передачи (РРП);  $ТС_M$  — показатель технического состояния муфт между двигателем и редуктором и муфт валопровода (М);  $ТС_{ПВ}$  — показатель технического состояния валопровода (для целей настоящей работы техническое состояние валопровода оценивается по техническому состоянию его подшипников (ПВ));  $ТС_{ДВЖ}$  — показатель технического состояния движителей (ДВЖ);  $ТС_{ЭЭУ}$  — показатель технического состояния электроэнергетической установки (ЭЭУ);  $ТС_{СС}$  — показатель технического состояния судовых систем (СС);  $ТС_{АК}$  — показатель технического состояния автономных котлов (АК);  $ТС_{УК}$  — показатель технического состояния утилизаторов теплоты выпускных газов (УК).

Каждый показатель представляется в виде функции частных показателей технического состояния подсистем элемента. В соответствии с требованиями Речного Регистра — организации по классификации судов внутреннего и смешанного плавания — негодное техническое состояние любого элемента СЭУ означает негодное состояние всей СЭУ. Однако для прогнозирования технического состояния важна количественная оценка технического состояния СЭУ в целом.

Каждый частный показатель технического состояния зависит от группы параметров, т. е. от определенного числа критериев. В этой связи в статье рассматривается задача многокритериального анализа, одним из способов решения которой является сведение множества критериев к одному (свертка критериев). Поскольку все параметры, от которых зависят частные показатели технического состояния, имеют определенную важность (вес), целесообразно воспользоваться сверткой, учитывающей эту важность. Для решения данной задачи воспользуемся мультипликативной стратегией свертки частных показателей, в результате использования которой целевая функция представляется произведением частных критериев, вес каждого из которых ранжирован с помощью весовых коэффициентов, представляемых в виде показателей степени частных критериев. Ясно, что чем больше весовой показатель, тем большая важность придается критерию. Использование мультипликативной свертки объясняется ее высокой чувствительностью к значениям частных показателей (низкие значения хотя бы одного частного критерия влекут резкое снижение целевой функции). Это обстоятельство признано экспертным сообществом чрезвычайно важным для системного описания технического состояния элементов СЭУ. Так, обобщенный показатель технического состояния ДВС представлен в виде

$$ТС_{ДВС} = ЧП_{ЭП}^{b_1} \cdot ЧП_{РП}^{b_2} \cdot ЧП_{СТ}^{b_3} \cdot ЧП_{ЦПГ}^{b_4} \cdot ЧП_{КВ}^{b_5} \cdot ЧП_{ССО}^{b_6} \cdot ЧП_{СУ}^{b_7} \cdot ЧП_{ТН}^{b_8} \cdot ЧП_{ЭК}^{b_9} \quad (1)$$

где  $b_1 \dots b_9$  — весовые коэффициенты, учитывающие влияние частных показателей ЧП на обобщенный показатель  $ТС_{ДВС}$  (их весомость); ЧП — частные показатели технического состояния ДВС по эффективным показателям (ЭП), рабочему процессу (РП), системе топливоподачи (СТ), цилиндро-поршневой группе (ЦПГ), коленчатому валу (КВ), системам смазывания и охлаждения (ССО), системе управления (СУ), турбоагнетателю (ТН), экологическим характеристикам (ЭК).

Шкалирование контролируемых параметров осуществлялось по результатам обработки данных, полученных в результате опроса экспертов. На оси абсцисс всех графиков шкалирования откладывалось отношение значения параметра к его нормированному значению, которое выбиралось либо в соответствии с нормами, указанными в нормативных документах (например, в Правилах Российского Речного Регистра) либо согласно указаниям технической документации на элементы СЭУ.

По оси ординат всех графиков шкалирования откладывались шкалированные значения параметров в диапазоне от нуля до значений больше единицы. Значению 1,0 на оси абсцисс на всех графиках соответствует шкалированное значение 1,0 — требуемое значение шкалированного показателя на номинальном режиме работы элемента СЭУ, соответствующее годному техническому состоянию. Шкалированное значение параметра больше единицы соответствует благоприятным для элемента СЭУ условиям работы при годном его состоянии, шкалированное значение параметра меньше единицы соответствует ухудшению условий работы элемента, что и отражает шкалированное значение данного показателя технического состояния. Стремление шкалированного



значения показателя к нулю символизирует ухудшение технического состояния элемента СЭУ вплоть до негодного технического состояния и отказа.

По результатам опроса экспертов определялись ранжированные показатели технического состояния всех выделенных (учитываемых) элементов СЭУ. В качестве примера приведем описание показателя ТС технического состояния ЭЭУ, представленного в виде функции

$$ТС_{ЭЭУ} = ЧП_{\Gamma}^{b_{13}} \cdot ЧП_{\text{К}}^{b_{14}} \cdot ЧП_{\text{РЩ}}^{b_{15}},$$

где  $ЧП_{\Gamma}$ ,  $ЧП_{\text{К}}$ ,  $ЧП_{\text{РЩ}}$  — частные показатели технического состояния ЭЭУ, соответственно, генераторов/валогенераторов ( $\Gamma$ ), кабельных трасс ( $\text{К}$ ), распределительных щитов ( $\text{РЩ}$ );  $b_{13} \dots b_{15}$  — весовые коэффициенты, учитывающие влияние ЧП на обобщенный показатель  $ТС_{ЭЭУ}$ .

Частные показатели представлены в виде функций:

$$ЧП_{\Gamma} = X_{52}^{a_{52}} \cdot X_{53}^{a_{53}} \cdot X_{54}^{a_{54}} \cdot X_{55}^{a_{55}} \cdot X_{56}^{a_{56}} \cdot X_{57}^{a_{57}} \cdot X_{58}^{a_{58}};$$

$$ЧП_{\text{К}} = X_{59}^{a_{59}};$$

$$ЧП_{\text{РЩ}} = X_{60}^{a_{60}} \cdot X_{61}^{a_{61}},$$

где  $X_{52} \dots X_{61}$  — шкалированные значения показателей технического состояния ЭЭУ, являющихся функцией контролируемых параметров соответственно;  $a_{52} \dots a_{61}$  — весовые коэффициенты, учитывающие влияние контролируемых параметров на частные показатели технического состояния ЭЭУ.

Шкалирование контролируемых параметров осуществлялось по результатам обработки данных опроса экспертов. Результаты опросов экспертов с ранжированием показателей технического состояния сведены в табл. 1.

Графики шкалирования аппроксимированы следующими уравнениями для определения показателей технического состояния  $X_{52} \dots X_{61}$ :

$$X_{52} = 1 - 100 \cdot (Z - 1)^2; X_{53} = Z^{-16}; X_{54} = 1 - 100 \cdot (Z - 1)^2; \begin{cases} X_{55} = -0,5 \cdot Z^3 + 1,5[0;1]; \\ X_{55} = Z^{-2}(1;\infty). \end{cases}$$

Таблица 1

Ранжированные показатели технического состояния ЭЭУ

| ЧП                 | Контролируемый параметр                                       | Обозначение | Шкалированный показатель ТС в порядке важности для каждого ЧП | Отношение $X_i/X_{i+1}$ | $a_i$               | Отношение ЧП по уровням               | $b_i$               |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| 1. ЧП <sub>Г</sub> | Напряжение $U_{\Gamma}$ , В                                   | $x_{52}$    | $X_{52}$                                                      | $X_{52}/X_{53}=1,00$    | $a_{52} = 0,163820$ | $ЧП_{\Gamma}/ЧП_{\text{К}} = 1,20$    | $b_{13}=0,395605$   |
|                    | Ток $I_{\Gamma}$ , А                                          | $x_{53}$    | $X_{53}$                                                      | $X_{53}/X_{54}=1,00$    | $a_{53} = 0,163820$ |                                       |                     |
|                    | Частота тока $\nu_{\Gamma}$ , Гц                              | $x_{54}$    | $X_{54}$                                                      | $X_{54}/X_{55}=1,00$    | $a_{54} = 0,163820$ |                                       |                     |
|                    | Сопротивление изоляции $\omega_{\Gamma}$ , МОм                | $x_{55}$    | $X_{55}$                                                      | $X_{55}/X_{56}=1,30$    | $a_{55} = 0,163820$ |                                       |                     |
|                    | Температура $t_{\text{стол}}$ статорной обмотки, °С           | $x_{56}$    | $X_{56}$                                                      | $X_{56}/X_{57}=1,10$    | $a_{56} = 0,126015$ |                                       |                     |
|                    | Температура $t_{\text{под}}$ подшипников, °С                  | $x_{57}$    | $X_{57}$                                                      | $X_{57}/X_{58}=1,10$    | $a_{57} = 0,114560$ |                                       |                     |
|                    | Вибрация (виброскорость $\nu_{\text{ген}}$ , мм/с) генератора | $x_{58}$    | $X_{58}$                                                      |                         | $a_{58} = 0,104145$ |                                       |                     |
| 2. ЧП <sub>К</sub> | Сопротивление изоляции $\omega_{\text{кт}}$ , МОм             | $x_{59}$    | $X_{59}$                                                      |                         | $a_{59} = 1,000000$ | $ЧП_{\text{К}}/ЧП_{\text{РЩ}} = 1,20$ | $b_{14} = 0,329670$ |

Таблица 1  
(Окончание)

|                     |                                                                                               |          |          |                      |                   |                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 3. ЧП <sub>РЩ</sub> | Равномерность распределения активной и реактивной нагрузки параллельно работающим генераторов | $x_{60}$ | $X_{60}$ | $X_{60}/X_{61}=1,26$ | $a_{60}=0,557522$ | $b_{15}=0,274725$ |
|                     | Правильное функционирование автоматики                                                        | $x_{61}$ | $X_{61}$ |                      | $a_{61}=0,442478$ |                   |

$$X_{56} = Z^{-16}; X_{57} = Z^{-16}; X_{58} = Z^{-4}; \begin{cases} X_{59} = -0,5 \cdot Z^3 + 1,5[0;1]; \\ X_{59} = Z^{-2}(1;\infty); \end{cases} \begin{cases} X_{60} = 0 \text{ при } Z=[0;1]; \\ X_{60} = 1 \text{ при } Z=(1;\infty); \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{61} = 0 \text{ при } Z=[0;1]; \\ X_{61} = 1 \text{ при } Z=(1;\infty), \end{cases}$$

где  $Z$  — отношение соответствующего контролируемого параметра к номинальному значению, а для  $X_{55}, X_{59}$  — к установленным Правилами Российского Речного Регистра нормам.

### Результаты (Results)

Полученные зависимости ориентированы на использование в компьютерной модели диагностирования технического состояния СЭУ, которая должна включать в себя количественные модели определения технического состояния всех принятых к рассмотрению в настоящем исследовании элементов СЭУ. Таким образом, компьютерная модель диагностирования технического состояния СЭУ должна включать в себя модели для определения частных показателей технического состояния  $TC_{ДВС}, TC_{РРП}, TC_M, TC_{ПВ}, TC_{ДВЖ}, TC_{ЭЭУ}, TC_{СС}, TC_{АК}, TC_{УК}$ . Тогда численная оценка технического состояния СЭУ может быть определена с помощью следующей модели:

$$TC_{СЭУ} = TC_{ДВС}^{c_1} \cdot TC_{РРП}^{c_2} \cdot TC_M^{c_3} \cdot TC_{ПВ}^{c_4} \cdot TC_{ДВЖ}^{c_5} \cdot TC_{ЭЭУ}^{c_6} \cdot TC_{СС}^{c_7} \cdot TC_{АК}^{c_8} \cdot TC_{УК}^{c_9}, \quad (2)$$

где  $TC_{СЭУ}$  — обобщенный количественный показатель технического состояния СЭУ;  $c_1 \dots c_9$  — весовые коэффициенты, учитывающие влияние технического состояния элементов СЭУ на обобщенный показатель. Эти коэффициенты получены по методике, аналогичной описанной выше.

Ранжирование выполнено с учетом принятой в работе структурной схемы СЭУ с разбиением на подсистемы. Обработанные результаты опросов экспертов с ранжированием показателей технического состояния после их стандартной обработки сведены в табл. 2.

Подставляя в уравнение (2) весовые коэффициенты из табл. 2, получим количественную модель определения технического состояния СЭУ в следующем виде:

$$TC_{СЭУ} = TC_{ДВС}^{0,157795} \cdot TC_{РРП}^{0,143451} \cdot TC_M^{0,136606} \cdot TC_{ПВ}^{0,136606} \cdot TC_{ДВЖ}^{0,136606} \cdot TC_{ЭЭУ}^{0,10449} \cdot TC_{СС}^{0,089273} \cdot TC_{АК}^{0,055107} \cdot 107 TC_{УК}^{0,055107}. \quad (3)$$

Таблица 2

### Ранжированные показатели технического состояния элементов СЭУ

| Обобщенный показатель технического состояния СЭУ | Показатели технического состояния элементов СЭУ | Отношение показателей $TC$ по уровням | $c_i$            |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| $TC_{СЭУ}$                                       | $TC_{ДВС}$                                      | $TC_{ДВС}/TC_{РРП} = 1,10$            | $c_1 = 0,157795$ |
|                                                  | $TC_{РРП}$                                      | $TC_{РРП}/TC_M = 1,09$                | $c_2 = 0,143451$ |
|                                                  | $TC_M$                                          | $TC_M/TC_{ПВ} = 1,00$                 | $c_3 = 0,136606$ |

Таблица 2  
(Окончание)

|                   |                   |                                             |                           |
|-------------------|-------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| ТС <sub>сэу</sub> | ТС <sub>пв</sub>  | ТС <sub>пв</sub> /ТС <sub>двж</sub> = 1,00  | c <sub>4</sub> = 0,136606 |
|                   | ТС <sub>двж</sub> | ТС <sub>двж</sub> /ТС <sub>ээу</sub> = 1,26 | c <sub>5</sub> = 0,136606 |
|                   | ТС <sub>ээу</sub> | ТС <sub>ээу</sub> /ТС <sub>сс</sub> = 1,17  | c <sub>6</sub> = 0,104449 |
|                   | ТС <sub>сс</sub>  | ТС <sub>сс</sub> /ТС <sub>ак</sub> = 1,62   | c <sub>7</sub> = 0,089273 |
|                   | ТС <sub>ак</sub>  | ТС <sub>ак</sub> /ТС <sub>ук</sub> = 1,00   | c <sub>8</sub> = 0,055107 |
|                   | ТС <sub>ук</sub>  |                                             | c <sub>9</sub> = 0,055107 |

Все уравнения для расчета частных показателей, необходимых для определения показателей технического состояния элементов СЭУ: ТС<sub>двс</sub>, ТС<sub>ррп</sub>, ТС<sub>м</sub>, ТС<sub>пв</sub>, ТС<sub>двж</sub>, ТС<sub>ээу</sub>, ТС<sub>сс</sub>, ТС<sub>ак</sub>, ТС<sub>ук</sub>, сами модели элементов СЭУ («свертки» частных показателей) и модель определения технического состояния СЭУ (3) образовали математическую модель определения показателя технического состояния СЭУ, реализованную в виде компьютерной программы для MS Excel.

Выбор платформы объясняется тем, что записанные в MS Excel программные коды на языке Visual Basic вместе с возможностями самой среды позволяют получить программный продукт, весьма удобный для проведения численных исследований тем, что он позволяет мгновенно получать результат (значения частных показателей, показателей технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом) при изменении значения любого из контролируемых параметров без дополнительного управления программой. Это свойство электронных таблиц MS Excel дает возможность считать разработанную компьютерную модель калькулятором технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом (далее — калькулятор). Выходные формы результатов вычисления ТС<sub>двс</sub> и ТС<sub>сэу</sub> с помощью калькулятора в виде электронных таблиц представлены на рис. 2 и 3.

|                |          |                   |          |                   |          |
|----------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| c <sub>1</sub> | 0,157796 | ТС <sub>двс</sub> | 0,794569 | ТС <sub>сэу</sub> | 0,964365 |
| c <sub>2</sub> | 0,143451 | ТС <sub>ррп</sub> | 1        |                   |          |
| c <sub>3</sub> | 0,131606 | ТС <sub>м</sub>   | 1        |                   |          |
| c <sub>4</sub> | 0,131606 | ТС <sub>пв</sub>  | 1        |                   |          |
| c <sub>5</sub> | 0,131606 | ТС <sub>двж</sub> | 1        |                   |          |
| c <sub>6</sub> | 0,104449 | ТС <sub>ээу</sub> | 1        |                   |          |
| c <sub>7</sub> | 0,089273 | ТС <sub>сс</sub>  | 1        |                   |          |
| c <sub>8</sub> | 0,055107 | ТС <sub>ак</sub>  | 1        |                   |          |
| c <sub>9</sub> | 0,055107 | ТС <sub>ук</sub>  | 1        |                   |          |

Рис. 2. Пример выходной формы результатов расчета ТС<sub>сэу</sub> с помощью разработанного калькулятора

Необходимо отметить, что в соответствии с требованиями Правил Российского Речного Регистра негодное техническое состояние любого элемента СЭУ означает негодное техническое состояние всей СЭУ. Это позволяет разделить процедуру определения технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом на две независимые части. Одна часть рассматриваемой процедуры имеет целью определение состояния «годен – не годен» с указанием негодного элемента и его параметров. Эта часть является важным инструментом эксперта Речного Регистра при освидетельствовании судов, так как позволяет на несколько порядков сократить время, затрачиваемое на освидетельствование, при значительном увеличении качества проверок. Для правильного функционирования этой части процедуры определения технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом необходимо установить «браковочные» значения ТС каждого элемента СЭУ, т. е. значения ТС, соответствующие выходу хотя бы одного параметра за границы диапазона допускаемых значений. «Браковочные» значения показателей «зашиваются» в компьютерную модель диагностирования СЭУ (калькулятор является только частью этой модели), благодаря чему эта модель устанавливает годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ.

|          |          |          |         |          |       |                   |         |
|----------|----------|----------|---------|----------|-------|-------------------|---------|
| $a_1$    | 0,333333 | $X_1$    | 0,75933 | $Z_1$    | 0,989 | ЧП <sub>н</sub>   | 0,79547 |
| $a_2$    | 0,333333 | $X_2$    | 0,72845 | $Z_2$    | 1,02  |                   |         |
| $a_3$    | 0,333333 | $X_3$    | 0,91    | $Z_3$    | 1,015 |                   |         |
| $a_4$    | 0,206896 | $X_4$    | 0,94652 | $Z_4$    | 0,99  | ЧП <sub>рн</sub>  | 0,8416  |
| $a_5$    | 0,206896 | $X_5$    | 0,94652 | $Z_5$    | 0,99  |                   |         |
| $a_6$    | 0,206896 | $X_6$    | 0,80103 | $Z_6$    | 0,98  |                   |         |
| $a_7$    | 0,206896 | $X_7$    | 0,72845 | $Z_7$    | 1,02  |                   |         |
| $a_8$    | 0,172414 | $X_8$    | 0,80103 | $Z_8$    | 0,98  | ЧП <sub>ст</sub>  | 0,92152 |
| $a_9$    | 0,221476 | $X_9$    | 0,94652 | $Z_9$    | 0,99  |                   |         |
| $a_{10}$ | 0,221476 | $X_{10}$ | 1       | $Z_{10}$ | 1     |                   |         |
| $a_{11}$ | 0,221476 | $X_{11}$ | 0,84    | $Z_{11}$ | 1,02  |                   |         |
| $a_{12}$ | 0,201342 | $X_{12}$ | 0,9216  | $Z_{12}$ | 1,014 | ЧП <sub>инт</sub> | 0,54069 |
| $a_{13}$ | 0,134228 | $X_{13}$ | 0,8976  | $Z_{13}$ | 1,016 |                   |         |
| $a_{14}$ | 0,423076 | $X_{14}$ | 0,8236  | $Z_{14}$ | 1,021 |                   |         |
| $a_{15}$ | 0,384615 | $X_{15}$ | 0,29189 | $Z_{15}$ | 1,08  |                   |         |
| $a_{16}$ | 0,192308 | $X_{16}$ | 0,73503 | $Z_{16}$ | 1,08  | ЧП <sub>кв</sub>  | 0,8045  |
| $a_{17}$ | 0,5      | $X_{17}$ | 0,88849 | $Z_{17}$ | 1,03  |                   |         |
| $a_{18}$ | 0,5      | $X_{18}$ | 0,72845 | $Z_{18}$ | 1,02  |                   |         |
| $a_{19}$ | 0,195548 | $X_{19}$ | 0,8704  | $Z_{19}$ | 1,018 | ЧП <sub>ссо</sub> | 0,88341 |
| $a_{20}$ | 0,16129  | $X_{20}$ | 0,95991 | $Z_{20}$ | 0,96  |                   |         |
| $a_{21}$ | 0,16129  | $X_{21}$ | 0,83205 | $Z_{21}$ | 1,05  |                   |         |
| $a_{22}$ | 0,16129  | $X_{22}$ | 0,99976 | $Z_{22}$ | 0,99  |                   |         |
| $a_{23}$ | 0,16129  | $X_{23}$ | 0,88314 | $Z_{23}$ | 0,93  |                   |         |
| $a_{24}$ | 0,16129  | $X_{24}$ | 0,77798 | $Z_{24}$ | 0,99  |                   |         |
| $a_{25}$ | 0,3      | $X_{25}$ | 0,8227  | $Z_{25}$ | 1,05  | ЧП <sub>су</sub>  | 0,85586 |
| $a_{26}$ | 0,3      | $X_{26}$ | 0,98025 | $Z_{26}$ | 1,005 |                   |         |
| $a_{27}$ | 0,2      | $X_{27}$ | 0,88849 | $Z_{27}$ | 1,03  |                   |         |
| $a_{28}$ | 0,2      | $X_{28}$ | 0,71365 | $Z_{28}$ | 1,088 |                   |         |
| $a_{29}$ | 0,230769 | $X_{29}$ | 0,77798 | $Z_{29}$ | 0,99  | ЧП <sub>тн</sub>  | 0,76517 |
| $a_{30}$ | 0,192307 | $X_{30}$ | 0,78941 | $Z_{30}$ | 1,03  |                   |         |
| $a_{31}$ | 0,192307 | $X_{31}$ | 0,71103 | $Z_{31}$ | 1,089 |                   |         |
| $a_{32}$ | 0,192307 | $X_{32}$ | 0,75933 | $Z_{32}$ | 0,989 |                   |         |
| $a_{33}$ | 0,192307 | $X_{33}$ | 0,7884  | $Z_{33}$ | 1,023 |                   |         |
| $a_{34}$ | 0,393939 | $X_{34}$ | 0,92991 | $Z_{34}$ | 1,037 | ЧП <sub>эк</sub>  | 0,86102 |
| $a_{35}$ | 0,30303  | $X_{35}$ | 0,82645 | $Z_{35}$ | 1,1   |                   |         |
| $a_{36}$ | 0,30303  | $X_{36}$ | 0,81162 | $Z_{36}$ | 1,11  |                   |         |

Рис. 3. Пример выходной формы расчета  $ТС_{ДВС}$  с помощью разработанного калькулятора

Цель другой части процедуры определения технического состояния рассматриваемых элементов состоит в получении значений показателей ТС элементов СЭУ для проведения анализа динамики изменения технического состояния этих элементов во времени и выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Это и компьютерное моделирование всевозможных эксплуатационных ситуаций, и прогнозирование развития неисправностей элементов СЭУ во времени вплоть до отказа в границах установленных «браковочных» значений. Последнее возможно по мере накопления данных обследований во времени.

Для определения «браковочного» значения технического состояния ДВС проводилось моделирование с помощью калькулятора путем последовательного изменения значений контролируемых параметров на границах диапазона допускаемых значений, при этом значение одного из параметров принималось на границе указанного диапазона, а остальные принимались с номинальными (паспортными) годными значениями. Результаты моделирования ситуаций изменения контролируемых параметров до своих предельных значений для определения «браковочного» значения технического состояния ДВС сведены в табл. 3. Границы диапазона допускаемых значений приняты с учетом установленных производителями ДВС и правилами Правил Российского Речного Регистра норм. В таблицу внесены наибольшие из рассчитанных «браковочных» значений ЧП и соответствующее им значение  $ТС_{ДВС}$ .

Таблица 3

**Результаты моделирования «браковочных» значений технического состояния ДВС**

|                                                         |                   |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Значение<br>«браковочного»<br>ЧП                        | ЧП <sub>ЭП</sub>  | 0,558716 | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>РП</sub>  | 1        | 0,578837 | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>СТ</sub>  | 1        | 1        | 0,556959 | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>ЦПГ</sub> | 1        | 1        | 1        | 0,423131 | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>КВ</sub>  | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,466507 | 1        | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>ССО</sub> | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,418357 | 1        | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>СУ</sub>  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,435275 | 1        | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>ТН</sub>  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,418479 | 1        |
|                                                         | ЧП <sub>ЭК</sub>  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0,420811 |
| Значение<br>«браковочного» ТС <sub>ДВС</sub>            |                   | 0,919036 | 0,935006 | 0,930588 | 0,89968  | 0,910537 | 0,909565 | 0,924968 | 0,921561 | 0,943673 |
| Наибольшее значение<br>«браковочного» ТС <sub>ДВС</sub> |                   | 0,943673 |          |          |          |          |          |          |          |          |

Моделирование показало, что частные показатели, входящие в ТС<sub>ДВС</sub>, имеют высокую чувствительность к отклонению контролируемых параметров. Например, при снижении максимального давления цикла  $p_{maxi}$  на 10 % (предельное значение) шкалированное значение контролируемого параметра снижается до 0,071179, а значение ЧП<sub>РП</sub> становится равным 0,578837 (данное значение получено при отклонении только одного из контролируемых показателей до своего предельного значения). При этом ТС<sub>ДВС</sub> = 0,935006, т. е. произошло его снижение на 7 %. Необходимо учитывать, что моделирование проведено при отклонении от номинального значения всего лишь одного из 36 контролируемых параметров, а поскольку многие параметры взаимосвязаны (например, давление наддува и частота вращения ротора турбонагнетателя, давление впрыскивания топлива и максимальное давление цикла и т. п.), обобщенный показатель технического состояния ТС<sub>ДВС</sub> будет еще более чувствителен к возникающим отклонениям в работе. Разработанная компьютерная модель определения технического состояния позволяет осуществлять контроль протекающих процессов в подсистемах ДВС с целью получения упреждающей информации о возможном отклонении показателей процессов от заданных значений в связи с появлением неисправности в какой-либо подсистеме ДВС.

В соответствии с алгоритмом моделирования компьютерная модель диагностирования СЭУ (эта модель включает в себя и калькулятор) производит сравнение текущего значения ТС<sub>ДВС</sub> с «браковочным» значением, «зашитым» в модель. При достижении ТС<sub>ДВС</sub> «браковочного» значения анализируются ЧП и в случае, если любой из текущих ЧП становится меньше соответствующего «браковочного» значения из табл. 3 или равным ему, компьютерной моделью устанавливается негодное техническое состояние соответствующего ДВС и, соответственно, всей СЭУ.

На рис. 4 представлены функции  $ТС_{ДВС} = f(ЧП_{ЭП}, ЧП_{РП}, ЧП_{СТ}, ЧП_{ЦПГ}, ЧП_{КВ}, ЧП_{ССО}, ЧП_{СУ}, ЧП_{ТН}, ЧП_{ЭК})$  для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений ЧП. Обобщенный технический показатель ТС<sub>ДВС</sub> будет пропорционален площади под кривой, полученной путем соединения точек, характеризующих значения ЧП. Данное свойство можно использовать для отслеживания динамики изменения ТС<sub>ДВС</sub> и прогнозирования приближения предельного технического состояния ДВС, при котором для ДВС устанавливается негодное техническое состояние. При достижении всех ЧП «браковочных» значений ТС<sub>ДВС</sub> = 0,479287, т. е. ДВС имеет годное техническое состояние при значении каждого ЧП выше «браковочного» и ТС<sub>ДВС</sub> > 0,479287.



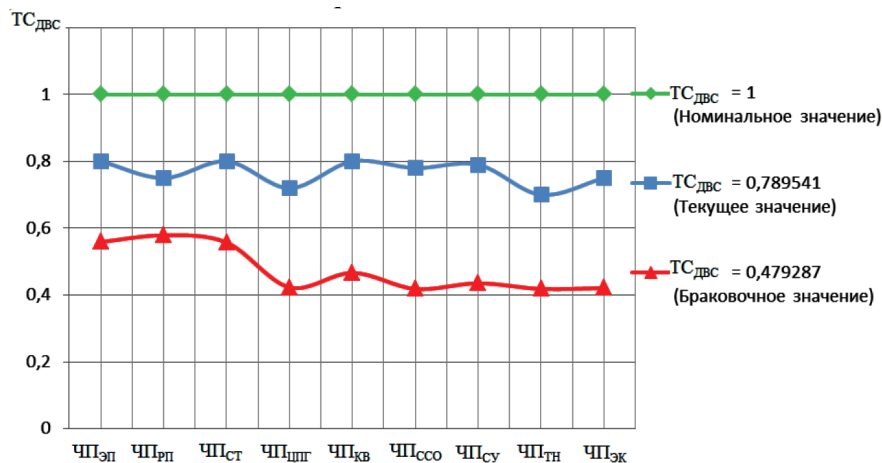


Рис. 4. Функции  $ТС_{ДВС} = f(ЧП_{ЭП}, ЧП_{РП}, ЧП_{СТ}, ЧП_{ЦП}, ЧП_{КВ}, ЧП_{ССО}, ЧП_{СУ}, ЧП_{ТН}, ЧП_{ЭК})$  для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений ЧП

Отметим, что значение  $ТС_{ДВС}$  рассчитывается компьютерной моделью диагностирования для каждого ДВС, при этом в расчет включаются (учитываются) наиболее «худшие» значения контролируемых параметров. Так, например, если двигатель имеет шесть цилиндров, то в расчет  $ТС_{ДВС}$  попадут наиболее низкие шкалированные значения контролируемых параметров, полученные для любого из шести цилиндров.

С помощью калькулятора технического состояния элементов СЭУ определены «браковочные» значения технического состояния всех выделенных элементов СЭУ, а также СЭУ в целом, что показано на рис. 5.

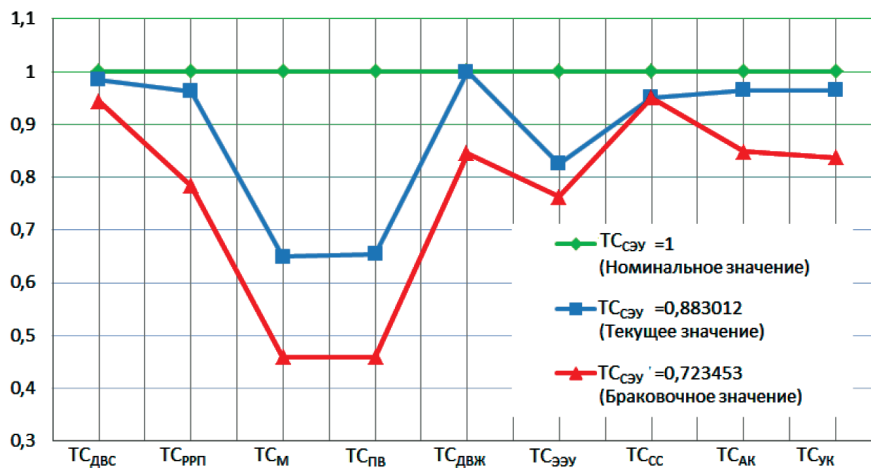


Рис. 5. Функции  $ТС_{СЭУ} = f(ТС_{ДВС}, ТС_{РРП}, ТС_{М}, ТС_{ПВ}, ТС_{ДВЖ}, ТС_{ЭЭУ}, ТС_{СС}, ТС_{АК}, ТС_{УК})$  для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений элементов СЭУ

На основании результатов проведенных предварительных исследований был разработан алгоритм функционирования компьютерной модели диагностирования технического состояния элементов СЭУ. Укороченная блок-схема алгоритма представлена на рис. 6. При функционировании блока анализа текущего технического состояния элементов СЭУ производится сравнение рассчитанных с помощью калькулятора значений ТС элементов СЭУ с «браковочными» и определяется состояние «годен – не годен» с указанием негодного элемента и его параметров.

Целью функционирования блока прогнозирования технического состояния элементов СЭУ является определение времени до достижения ТС  $i$ -го элемента СЭУ «браковочного» значения, т. е. прогнозирование продолжительности периода «годного» состояния.

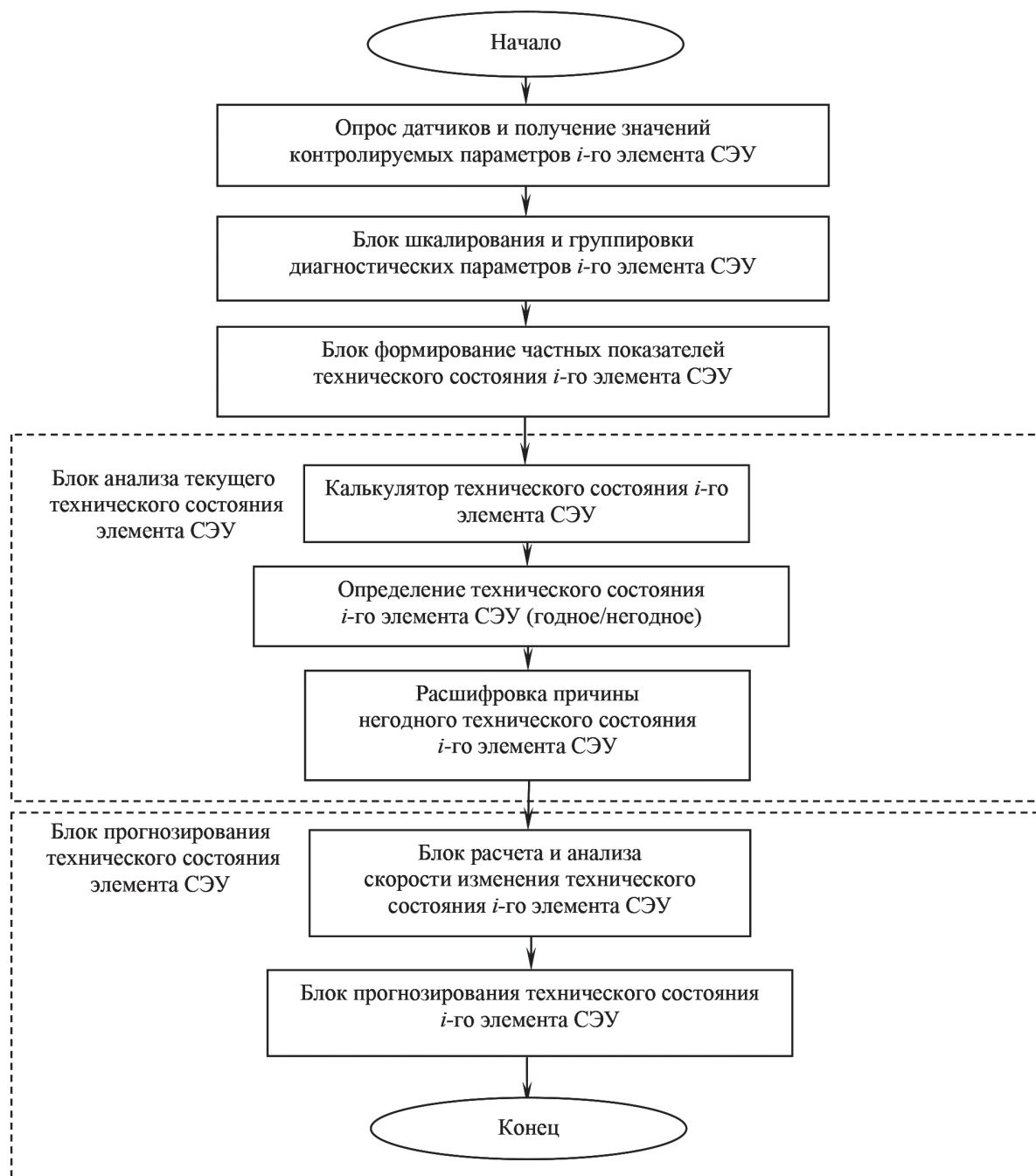


Рис. 6. Блок-схема алгоритма функционирования компьютерной модели диагностирования технического состояния элементов СЭУ

При невыполнении условия  $TC_{i,n} > TC_{i, \text{брак}}$  ( $TC_{i,n}$  — значение технического состояния  $i$ -го элемента СЭУ при текущем измерении,  $TC_{i, \text{брак}}$  — значение «браковочного» ТС  $i$ -го элемента) компьютерная модель диагностирования выведет информацию о достижении  $TC_i$  «браковочного» значения, и активируется подпрограмма анализа скорости изменения частных показателей  $i$ -го элемента СЭУ. Необходимо отметить, что анализ скорости изменения частных показателей является важным элементом процедуры прогнозирования, поскольку позволяет, во-первых, настроить модель прогнозирования или при более развитом алгоритме выбрать модель прогнозирования из заранее предусмотренного набора (экспоненциальное сглаживание, регрессионное оценивание, цепи Маркова, передаточные функции и т. д.), а во-вторых оценить, по какому из ЧП возможен отказ в границах установленных «браковочных» значений.

### Заключение (Conclusion)

Разработанная компьютерная модель диагностирования позволяет получить численную оценку ТС элементов СЭУ и СЭУ в целом, установить годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ, а также проанализировать динамику изменения технического состояния этих элементов во времени для выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Как отмечалось ранее, знание закономерностей изменения ТС имеет большое практическое значение, поскольку позволяет рассчитывать не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и возможность их использования в классификационной деятельности организации для определения годного или негодного технического состояния элементов СЭУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский В. Г. Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации / В. Г. Ивановский, Р. А. Варбанец // Всеукраинский научно-технический журнал. — 2004. — № 2. — С. 138–141.
2. Епихин А. И. Модуль диагностики двигателя внутреннего сгорания в системе поддержки принятия решений экипажем танкера-газовоза / А. И. Епихин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 4. — С. 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.
3. Характеристики систем диагностики судовой дизельной установки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vdvzhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistem-diagnostiki-sudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html> (дата обращения: 15.12.2017).
4. Лашко В. А. Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС / В. А. Лашко // Ученые заметки ТОГУ. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 260–287.
5. Елизаров И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов. — М.: Машиностроение, 2004. — 180 с.
6. Грошева Л. С. Разработка комплексной системы контроля и управления на базе промышленных контроллеров FASTWEL / Л. С. Грошева, В. И. Мерзляков, С. И. Перевезенцев, В. И. Плющаев // Современные технологии автоматизации. — 2015. — № 3. — С. 46–50.
7. Соловьёв А. В. Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.
8. Соловьёв А. В. Принципы взаимодействия судоводителя с единой целеориентированной системой управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2017. — № 53. — С. 42–47.
9. Васильев Б. В. Диагностирование технического состояния судовых дизелей / Б. В. Васильев, Д. И. Кофман, С. Г. Эренбург; под ред. Б. В. Васильева. — М.: Транспорт, 1982. — 144 с.
10. Моек Е. Техническая диагностика судовых машин и механизмов / Е. Моек, Х. Штрикерт; пер. с нем. Э. Б. Кублановой. — Л.: Судостроение, 1986. — 231 с.

### REFERENCES

1. Ivanovskii, V.G., and R.A. Varbanets. "Monitoring rabocheho protsessha sudovykh dizelei v ekspluatatsii." *Vseukrainskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal* 2 (2004): 138–141.
2. Epikhin, Alexey Ivanovich. "Module for diagnosis of the internal combustion engine in the decision support system by the crew of the tanker-gas carrier." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2017): 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.
3. Kharakteristiki sistem diagnostiki sudovoi dizel'noi ustanovki. Web. 15 Dec. 2017 <<http://vdvzhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistem-diagnostiki-sudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html>>.

4. Lashko, V.A. "Prospects of development of intellectual of the piston internal combustion engine." *Uchenye zametki TOGU* 5.1 (2014): 260–287.
5. Elizarov, I.A., Yu.F. Martem'yanov, A.G. Skhirtladze, and S.V. Frolov. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskie komplekсы i kontrolyery: ucheb. posobie*. M.: Mashinostroenie, 2004.
6. Grosheva, L.S., V.I. Merzlyakov, S.I. Perevezentsev, and V.I. Plyushchaev. "Razrabotka kompleksnoi sistemy kontrolya i upravleniya na baze promyshlennykh kontrollerov FASTWEL." *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* 3 (2015): 46–50.
7. Soloviev, Alexey V. "The concept of a unified goal directed management of marine power plant." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.
8. Solovyov, A.V. "Principles of interaction of the navigator with a unified target-oriented management system of marine power plant." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 53 (2017): 42–47.
9. Vasil'ev, B.V., D.I. Kofman, and S. G. Erenburg. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh dizelei*. Edited by B.V. Vasil'ev. M.: Transport, 1982.
10. Moek, E., and Kh. Shtrikert. *Tekhnicheskaya diagnostika sudovykh mashin i mekhanizmov*. L.: Sudostroenie, 1986.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Соловьёв Алексей Валерьевич** —  
кандидат технических наук,  
заместитель директора  
ФАУ «Российский Речной Регистр»  
Верхне-Волжский филиал Российского Речного  
Регистра  
603001, Российская Федерация,  
г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в  
e-mail: [solovev@rivregnn.ru](mailto:solovev@rivregnn.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Soloviev, Alexey V.** —  
PhD, deputy director  
The Federal Autonomous Institute  
Russian River Register  
Upper Volga Branch-Office  
38v Rozhdestvenskaya Str.,  
Nizhniy Novgorod, 603001,  
Russian Federation  
e-mail: [solovev@rivregnn.ru](mailto:solovev@rivregnn.ru)

*Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.*  
*Received: January 15, 2018.*

Научное периодическое издание

# **Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Том 10. № 1**

**2018 год**

Выпускающий редактор

*Н. А. Карамзина*

Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.02.18. Формат 60×90/8  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 31,5. Тираж 500 экз. Заказ № 134/2018

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7